www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

17e JAARGANG No. 3, blz. 65-100 MAART 1955

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

TOEPASSING VAN DE RÖNTGENBEELDVERSTERKER

I. ALGEMEEN OVERZICHT
II. DE ZICHTBAARHEID VAN KLEINE OBJECTDETAILS
III. OPTISCHE HULPMIDDELEN BIJ DE BEELDVERSTERKER
IV. EEN INRICHTING VOOR GERICHTE RÖNTGENFOTO'S, VOORZIEN VAN EEN BEELDVERSTERKER MET PERISCOOP-OPTIEK
V. MEDISCHE BESCHOUWINGEN BETREFFENDE DE BEELDVERSTERKER
VI. MATERIAALONDERZOEK MET DE BEELDVERSTERKER

Reeds jarenlang heeft de electronentechniek zich succesvol beziggehouden met het probleem om zeer zwakke electrische stromen of spanningen te versterken. Gedeeltelijk onder invloed van de televisietechniek ontwikkelt zich de laatste jaren een nieuw gebied der electronentechniek, nl. het versterken van zeer zwakke lichtstromen en helderheden. Aanvankelijk was deze ontwikkeling gericht op het omzetten van licht van lange golflengten in kortgolvig licht (zg. golflengtetransformatie); reeds in 1934 werd hieraan in het Philipslaboratorium te Eindhoven onderzoek verricht. Thans staat de helderheidsversterking meer op de voorgrond en is het onderzoek er vooral op gericht zwakke röntgenfluorescentiebeelden door versterking beter bruikbaar te maken.

Sinds het verschijnen van het eerste artikel over de röntgenbeeldversterker in dit tijdschrift in 1952 zijn uit metingen in het laboratorium en beproeving in de practijk een aantal waardevolle gegevens over de beeldversterker verkregen. Het scheen ons daarom gerechtvaardigd deze vooruitgang in enkele artikelen te behandelen. Voor een deel komen hierbij ter sprake bijzonderheden die in genoemd artikel reeds werden aangestipt. De hoofdonderwerpen zijn: de grootte der kleinste details die met behulp van de beeldversterker nog waargenomen kunnen worden; de optische problemen welke zich voordoen; fotografie en cinematografie met de beeldversterker.

In deze reeks artikelen zal in hoofdzaak worden gesproken over de thans bestaande uitvoering van de beeldversterker. Dat men er weinig over de toekomstige ontwikkeling van de beeldversterking in zal vinden, wil echter niet zeggen, dat we menen dat het thans bereikte resultaat het eindpunt zal zijn. Integendeel, dit onderwerp is nog in volle groei en we hopen er in de volgende jaren verschillende malen op terug te komen om mededelingen over de verdere ontwikkeling te doen.

I. ALGEMEEN OVERZICHT

door M. C. TEVES. 621.386.8:616-073.75:621.383.8

Ter inleiding moge kort herinnerd worden aan het doel, het principe en de constructie van de röntgenbeeldversterker, zoals deze momenteel in regelmatige productie is [1]).

Het doel van de beeldversterker is, een maximale informatie uit het röntgenbeeld van een doorstraald voorwerp te verkrijgen bij een gegeven röntgendosisbelasting van het object.

In een van de volgende artikelen (II) wordt uitvoerig nagegaan waardoor deze maximale informatie theoretisch en practisch wordt bepaald. Hierop vooruitlopend kan worden geconstateerd dat bij de normale wijze van röntgendoorlichting de informatie die aanwezig is in het doorlichtingsscherm, gegeven wordt door de in het scherm geabsorbeerde röntgenstraling. De hoeveelheid hiervan houdt nauw verband met de dosis die de patient krijgt. Deze informatie kan door de waarnemer niet ten volle gebruikt worden. De oorzaak hiervan zal blijken te zijn de gebrekkige optische koppeling tussen het

[1]) M. C. Teves en T. Tol, Electronische versterking van röntgenbeelden, Philips techn. T. **14**, 65-75, 1952.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

fluorescentiescherm en het menselijke detectieorgaan (netvlies van het waarnemende oog). Hetzelfde geldt voor de röntgencamerafotografie. Ook hier verliezen wij bij de optische koppeling tussen fluorescentiescherm en fotografische film veel licht, waardoor de in het fluorescentiescherm aanwezige informatie slechts voor ca. 1% wordt overgebracht.

De directe röntgenfotografie staat er in dit opzicht veel gunstiger voor. Door het volledige optische contact tussen fluorescentiescherm en fotografische film treedt hier geen lichtverlies op. Terwijl bij de beide eerstgenoemde methodes de toepassing van de beeldversterkerbuis een aanzienlijke winst aan beschikbare informatie bij gelijke dosis betekent, zal ten opzichte van directe röntgenfotografie daarom de toepassing van de beeldversterker slechts secundaire voordelen bieden. Hier moet het voordeel dus niet in de betere informatie, maar in de geringere dosis en de mogelijkheid van cinematografie gevonden worden.

Gezien uit boven geschetste gezichtshoek dient de beeldversterker op de eerste plaats om het lichtverlies dat optreedt bij de optische koppeling tussen fluorescentiescherm en lichtdetector (netvlies van het menselijk oog, fotografische film, eventueel fotokathode van een televisieopneembuis) te compenseren. Daarnaast vergemakkelijkt hij ook het waarnemen.

Beschrijving van de beeldversterker

De beeldversterker bestaat uit een geëvacueerde glazen buis, waarin een röntgenscherm is aangebracht op een dunne drager van aluminium (*fig. 1*). In contact met het röntgenscherm bevindt zich een fotokathode. Wanneer men röntgenstralen op het scherm laat vallen, wordt fluorescentielicht opgewekt. Dit licht maakt op elk punt van de fotokathode een aantal electronen vrij, evenredig met de lichtsterkte van het röntgenscherm op dat punt. Dit electronenbeeld wordt met behulp van een electrisch veld afgebeeld op een tweede fluorescentiescherm, het kijkscherm, en daarbij 9× verkleind. De energie der op het kijkscherm vallende electronen wordt hier voor een deel weer in fluorescentielicht omgezet, men verkrijgt dus op het kijkscherm een 9× verkleinde weergave van het beeld op het röntgenscherm. Met een kijker met ongeveer 9-voudige vergroting ziet men het röntgenbeeld van 13 cm diameter ten slotte in zijn oorspronkelijke grootte en rechtop, maar het is ongeveer 1000 maal helderder.

De helderheidsversterking komt door twee (in wezen niet onafhankelijke) factoren tot stand. De eerste factor is een vergroting van de totale lichtstroom (de zg. lumenversterking) doordat de electronen die de fotokathode uitzendt, door het electrische veld worden versneld: tussen het kijkscherm en de fotokathode staat een versnellende spanning van ongeveer 25 kilovolt. Hoe meer energie een electron bij aankomst op het kijkscherm

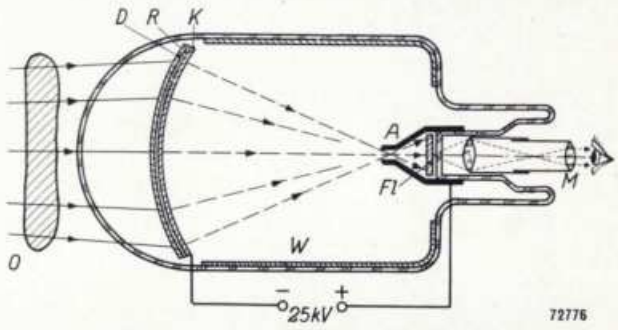


Fig. 1. Schematische doorsnede van de beeldversterkerbuis. *R* röntgenscherm, waarop de röntgenstralen vallen, die het te onderzoeken object *O* en de glazen wand van de buis zijn gepasseerd. *D* drager van röntgenscherm en fotokathode *K*. De in *R* opgewekte fluorescentiestraling maakt in de fotokathode electronen vrij. Het „electronenbeeld" wordt door het electrische veld tussen *K* en de doorboorde anode *A* verkleind afgebeeld op het kijkscherm *Fl*. Dit wordt door een eenvoudige microscoop *M* bekeken. *W* is een geleidende bekleding op de binnenwand van de buis.

bezit, des te meer fluorescentielicht zal het hierin kunnen opwekken. Ondanks het feit dat slechts ca. 1 op 10 lichtquanta van het röntgenscherm een electron vrijmaakt en op het kijkscherm slechts een tiende van de electronenenergie in licht wordt omgezet, levert dit kijkscherm dank zij de energietoevoer aan de electronen toch in totaal een 10 tot 15 maal zo grote lichtstroom (gemeten in lumens) als een normaal doorlichtingsscherm waarop hetzelfde object wordt waargenomen.

De tweede winstfactor is te danken aan de electronenoptische verkleining van het beeld. Alle foto-electronen werken aan de vorming van het beeld mee en de opgewekte hoeveelheid licht is er onafhankelijk van of die electronen over een groot dan wel klein oppervlak worden verdeeld. Door te werken met een 9-voudige verkleining, concentreren wij de electronenenergie op een 9^2 maal kleinere oppervlakte; de totale lichtstroom wordt dus door een ca. 80 maal kleinere oppervlakte uitgestraald dan bij afbeelding op schaal 1 : 1. Dit betekent per definitie een 80 maal grotere luminantie. De totale helderheidsversterking is gelijk aan het product van de lumenversterking en deze verkleiningswinst; in het geval van de beschreven buis dus 10 tot 15 maal 9^2, d.i. 800 tot 1200. Hierdoor is de helderheid op een zodanig niveau gebracht, dat zowel bij visueel waarnemen als bij het maken van een foto het lichtverlies bij de optische afbeelding ruimschoots wordt gecompenseerd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Bij het omzetten van het lichtzwakke in het lichtsterke beeld moet ervoor worden gewaakt dat ten gevolge van onvolkomenheden in de apparatuur de contrasten achteruitgaan of een verlies aan scherpte van het beeld optreedt.

Wat de scherpte betreft, deze wordt bij de beschreven beeldversterker in hoofdzaak beperkt door de dikte van het röntgenfluorescentiescherm. Een volgende oorzaak van onscherpte is gelegen in het kijkscherm; de onscherpte van de electronenoptische afbeelding speelt een ondergeschikte rol.

Kleine contrasten in het lichtzwakke röntgenbeeld blijven bij de lichttransformatie in principe onveranderd (de γ van de beeldversterker is één). Een klein contrastverlies ten gevolge van een „sluier", d.i. een min of meer gelijkmatig over het beeld verdeelde helderheidsbijdrage, is in de practijk onvermijdelijk. De verbetering van de contrastgevoeligheid van het oog bij grotere helderheid is echter vele malen groter dan dit contrastverlies. Bij foto's is de contrastvermindering op te vangen door de keuze van een film met voldoend grote γ.

Hoewel het noodzakelijk is, met behulp van „fantoomproeven" in het laboratorium de eigenschappen en mogelijkheden van de beeldversterker uitvoerig na te gaan (zie artikel II), kunnen de merites wat de medische toepassing betreft alleen getoetst worden in de medische practijk. Dit geschiedt op vrij uitgebreide schaal op vele plaatsen, o.a. in het Philips Gezondheidscentrum te Eindhoven onder leiding van Prof. Dr. Burger en Dr. Feddema [2]) en in Maastricht door Dr. Van der Plaats [3]).

Zonder te veel op bijzonderheden in te gaan, kunnen wij aan bovengenoemde medische onderzoekingen thans reeds de volgende gevallen ontlenen waarin de beeldversterker zijn bruikbaarheid heeft bewezen (zie artikel V).

Bij een longdoorlichting kan met een tiende gedeelte van de röntgendosis worden volstaan. Niet alleen is de detailwaarneembaarheid onder deze omstandigheden op z'n minst zo goed als zonder beeldversterker, maar bovendien kan het onderzoek worden verricht in een matig verlichte kamer, zonder voorafgaande adaptatie.

Voor het localiseren van vreemde voorwerpen (zoals bijv. metaaldelen) is de beeldversterker uitermate geschikt, evenals voor controle bij het zetten van beenbreuken.

Bij de waarneming van een met contrastmiddel gevulde slokdarm, maag en darmkanaal is de beeldversterkerdoorlichting te prefereren boven de normale doorlichting.

Een belangrijk toepassingsgebied van de beeldversterker is het visueel instellen van het beeld vlak vóór het maken van een normale röntgenfoto op ware grootte (gerichte röntgenfotografie).

Men kan zeggen dat in de medische practijk blijkt dat vooral in die gevallen waar het beperkte veld van 13 cm diameter geen bezwaar is, de beeldversterkerdoorlichting superieur is aan de normale doorlichting.

Voor de röntgenfotografie met de beeldversterker, waarbij het kijkscherm van de beeldversterker met behulp van een camera op een fotografische film wordt afgebeeld, zijn er medisch gesproken twee toepassingsgebieden aan te wijzen:

1) het maken van enkele foto's, of eventueel series,
2) de röntgencinematografie.

Op beide gebieden is reeds veel materiaal verzameld. Het is gebleken dat op fijnkorrelig filmmateriaal de kwaliteit van een beeldversterkerfoto op 35 mm-film die van een normale röntgenfoto op ware grootte benadert. Bij een goed gekozen optisch systeem is daarbij de röntgendosis per foto nog een factor 2-3 geringer dan bij de foto op ware grootte.

Wat betreft de röntgencinematografie met beeldversterker, kunnen wij hier volstaan met de vermelding dat zelfs bij vrij lange filmstroken de röntgendosis voor de patient geen gevaar meer oplevert. Daardoor is het mogelijk het fotografisch röntgenonderzoek behalve voor anatomische toepassingen ook te gebruiken voor physiologische studies.

Resumerend kunnen wij zeggen dat de beeldversterker in zijn huidige vorm voor een groot aantal gevallen uit de medische practijk zijn bruikbaarheid heeft bewezen. De ontwikkeling kan echter nog niet als afgesloten worden beschouwd. Een van de wensen uit de medische practijk blijft een groter beeldveld. Daarnaast dient nog aandacht geschonken te worden aan onderzoekingen van de methodes waarop het beeld aan de waarnemer gepresenteerd wordt. Dit is niet alleen van belang voor de doorlichting maar in het bijzonder ook voor de cinematografie. Het is nog een probleem hoe men de in de filmstrook aanwezige informatie op eenvoudige wijze volledig aan de waarnemer ter beschikking stelt.

Ten slotte willen wij er op wijzen dat ook in de techniek de beeldversterker diensten kan bewijzen. Door de grote beeldhelderheid kunnen werkstukken van metalen met veel grotere wanddikten dan tot dusver visueel worden onderzocht. Artikel VI geeft hiervan enkele voorbeelden.

---

[2]) J. Feddema, Brit. J. Radiology, in druk.
[3]) G. J. van der Plaats, De röntgendoorlichting in verband met nieuwe ervaringen met de beeldversterker, Ned. T. Geneesk. **97**, 1056-1063, 1953.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

II. DE ZICHTBAARHEID VAN KLEINE OBJECTDETAILS

door T. TOL en W. J. OOSTERKAMP. 621.386.8:616-073.75:621.383.8

Het streven in de röntgendiagnostiek is erop gericht, met een zo klein mogelijke röntgendosis voor de patient de gewenste inlichtingen over het te onderzoeken lichaamsdeel te verkrijgen. Wat de dosisbelasting van de patient betreft, deze zal in het algemeen bij de directe visuele waarneming van het röntgenbeeld aanzienlijk groter zijn dan bij het maken van één enkele röntgenfoto. Immers, om de details van het gehele doorlichtingsbeeld goed te kunnen waarnemen, zal de röntgenoloog enige tijd nodig hebben. Bij het maken van een foto wordt de patient slechts gedurende de korte belichtingstijd bestraald en kan de röntgenoloog na ontwikkeling van de foto op zijn gemak de film bekijken. Hiertegenover staat dat de foto hem slechts één momentopname geeft en derhalve niets leert omtrent organen op verschillende tijdstippen, wat van belang is indien deze bewegen of wanneer het verloop van een eenmalig verschijnsel, bijv het inspuiten van een contrastvloeistof, nagegaan moet worden. De grotere röntgendosis bij de visuele waarneming van het doorlichtingsbeeld levert dus extra informatie op. Beide methodes, de visuele en de fotografische, hebben zich in de röntgendiagnostiek naast elkaar gehandhaafd en vullen elkaar aan. Wij zullen nu bespreken in hoeverre de beide methodes verbeterd kunnen worden door gebruik te maken van de beeldversterker. Daarvoor is zowel theoretisch als experimenteel nagegaan wat bij gegeven dosisbelasting de minimale contrasten en detailafmetingen zijn, welke kunnen worden waargenomen zonder en met beeldversterker, visueel zowel als fotografisch.

Principiële grens van de detailwaarneembaarheid

Zoals vroeger reeds is meegedeeld [1]), wordt bij alle röntgenologische waarnemingsmethodes aan het waarnemen van kleine objectdetails een grens gesteld, welke volgens Rose [2]) en Sturm en Morgan [3]) wordt bepaald door de fluctuaties of de ruis in het aantal quanta of deeltjes, die betrokken zijn bij de verschillende fazen van het waarnemen van een objectdetail. Bij de doorlichting bijv. kan men een objectdetail niet waarnemen indien het helderheidsverschil tussen dit objectdetail en zijn omgeving niet groter is dan de natuurlijke fluctuatie van de helderheid. Een analoge redenering geldt bij een foto voor de plaatselijke fluctuaties van de fotografische zwarting, ten gevolge van de eindige grootte en wisselende opeenhoping der gezwarte korrels.

De grootte van de resulterende fluctuaties wordt in hoofdzaak bepaald door die faze van het waarnemingsproces waarbij het gemiddelde aantal $\overline{N}$ van de quanta of deeltjes het kleinst is ($\overline{N}_{\min}$). De „standaardfluctuatie" hiervan is $\sqrt{\overline{N}_{\min}}$. Het contrast van twee gebiedjes met verschillende helderheid I_1 en I_2 wordt gedefinieerd als

$$C = \frac{I_1 - I_2}{I_1}.$$

De fluctuaties in helderheid veroorzaken contrasten welke bepaald worden door $I_1 \sim \overline{N}_{\min}$ en $I_2 \sim N_{\min} - \sqrt{\overline{N}_{\min}}$ zodat dus $C_{\text{fluct}} = 1/\sqrt{\overline{N}_{\min}}$. Het minimumcontrast dat nog met zekerheid boven deze fluctuaties uit waarneembaar is, bedraagt daarom $C_{\min} = k/\sqrt{\overline{N}_{\min}}$, waarbij k groter is dan 1; uit de experimentele resultaten zal aannemelijk worden gemaakt dat k ongeveer de waarde 3 heeft. Bij bekende $\overline{N}_{\min}$ is dit minimumcontrast dus te berekenen en, doordat $\overline{N}$ evenredig is met de oppervlakte van het beschouwde detail, ook het minimumcontrast als functie van de detaildiameter d. Hiermee is een theoretische quantitatieve grens voor het waarnemen van details bepaald. In een diagram waarin $C_{\min}$ tegen d op logarithmische schaal wordt uitgezet, krijgt men rechte lijnen.

Aantallen quanta in de fazen van het waarnemingsproces

In *fig. 1* zijn de uit metingen berekende aantallen quanta voor de doorlichting zonder en met beeldversterker bij de verschillende fazen van het waarnemingsproces uitgezet. Aangenomen is dat de accumulatietijd van het oog, d.i. de tijd gedurende welke het oog een zeker aantal in het netvlies geabsorbeerde lichtquanta nog tot één lichtindruk kan verwerken, gelijk is aan 0,2 sec [2]).

Bij de doorlichting zonder beeldversterker treft maar een uiterst kleine fractie (ongev. 0,2 ‰) van het schermlicht de oogpupil. In de keten van de beeldoverdracht is daarom het aantal quanta per beeldelement op het netvlies het kleinst: 100 röntgenquanta moeten in het scherm worden geabsorbeerd om ten slotte 1 lichtquantum in het netvlies

---

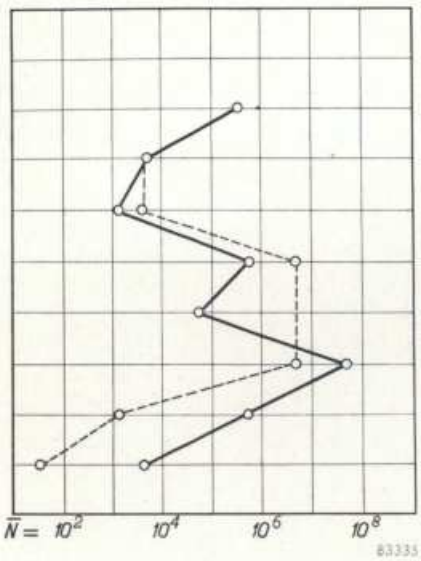
[1]) M. C. Teves en T. Tol, Electronische versterking van röntgenbeelden, Philips techn. T. **14**, 65-75, 1952.

[2]) A. Rose, The sensitivity performance of the human eye on an absolute scale, J. Opt. Soc. Amer. **38**, 196-208, 1948.

[3]) R. E. Sturm en R. H. Morgan, Screen intensification systems and their limitations, Amer. J. Röntg. Rad. Ther. **62**, 617-634, 1949.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



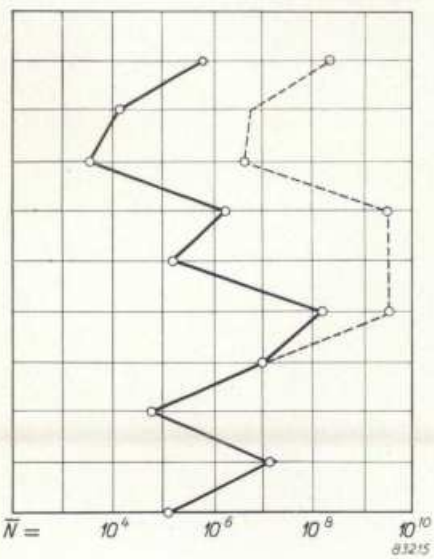
Faze	Aard van de quanta	$\overline{N}$ Zonder BV	$\overline{N}$ Met BV
Op object	Röntgenquanta	$2{,}5\cdot10^5$	$2{,}5\cdot10^5$
Doorgelaten door object	„	$5\cdot10^3$	$5\cdot10^3$
Geabsorbeerd in röntgenscherm	„	$4\cdot10^3$	$1{,}2\cdot10^3$
Geëmitteerd in röntgenscherm	Lichtquanta	$4{,}5\cdot10^6$	$6\cdot10^5$
Geëmitteerd door fotokathode	Electronen		$6\cdot10^4$
Geëmitteerd door kijkscherm	Lichtquanta		$6\cdot10^7$
In oogpupil	„	$1{,}2\cdot10^3$	$4\cdot10^5$
Geabsorbeerd in netvlies	„	$3\cdot10^1$	$4\cdot10^3$

Fig. 1. Gemiddelde aantallen quanta of deeltjes $\overline{N}$, voor een rond detail van 2 mm diameter, werkzaam gedurende 0,2 sec, in verschillende fazen bij de doorlichting. zonder beeldversterker (gestippeld) en met beeldversterker (getrokken).
Object: 8 cm „Philite" + strooistralenrooster. Focusafstand: 90 cm. 40 kV, 1 mA.

nuttig werkzaam te doen zijn. De relatieve fluctuaties in dit aantal vormen dus een principiële grens voor de waarneembaarheid van het detail.

Bij de doorlichting met de beeldversterker evenwel is door de duizendvoudige helderheidsversterking het aantal lichtquanta zodanig vergroot dat dit het aantal geabsorbeerde röntgenquanta overtreft. Het waarnemen van details wordt nu beperkt door het laatstgenoemde aantal. De kleinste aantallen quanta zijn 40× zo groot en de procentuele fluctuaties $\sqrt{40}$ = ca. 6× zo klein geworden als bij de doorlichting zonder beeldversterker. Daarom is de principiële limietwaarde van het nog juist waar te nemen contrast (bij gegeven afmeting van het detail) ook 6× kleiner.

Als geen rekening met de röntgenquantafluctua-



Faze	Aard van de quanta	$\overline{N}$ Zonder BV	$\overline{N}$ Met BV
Op object	Röntgenquanta	$2{,}2\cdot10^8$	$7{,}5\cdot10^5$
Doorgelaten door object	„	$4{,}5\cdot10^6$	$1{,}5\cdot10^4$
Geabsorbeerd in röntgenscherm	„	$3{,}5\cdot10^6$	$3{,}5\cdot10^3$
Geëmitteerd in röntgenscherm	Lichtquanta	$4{,}0\cdot10^9$	$1{,}8\cdot10^6$
Geëmitteerd door fotokathode	Electronen		$1{,}8\cdot10^5$
Geëmitteerd door kijkscherm	Lichtquanta		$1{,}8\cdot10^8$
Op fotografische emulsie	„	$1{,}6\cdot10^7$	10^7
In fotografische emulsie	Gezwarte korrels	$5\cdot10^4$	$6\cdot10^4$
In oogpupil	Lichtquanta	$1{,}5\cdot10^7$	$1{,}5\cdot10^7$
Geabsorbeerd in netvlies (per 0,2 sec)	„	$2{,}5\cdot10^5$	$2{,}5\cdot10^5$

Fig. 2. Gemiddelde aantallen quanta of deeltjes $\overline{N}$, per detail van 2 mm Ø werkzaam bij de röntgencamerafotografie zonder (gestippeld) resp. met beeldversterker (getrokken).
Zonder beeldversterker: Afbeelding van het röntgenscherm met behulp van een spiegeloptiek $f/d = 1$ op 70 mm-film („Scopix Ortho"). Totale verkleining 7×. 40 kV; 180 mAs.
Met beeldversterker: Afbeelding van het kijkscherm van de beeldversterker met behulp van een lenzenoptiek (twee lenzen: $f/d = 1{,}5$, $f = 55$ mm, en $f/d = 2{,}0$, $f = 75$ mm) op 35 mm-film (Agfa „Fluorapid"). Totale verkleining 6,5× (nl. verkleining in beeldversterker 9×; daarna 1,4× vergroot op de film). 40 kV; 0,6 mAs.
Object: 8 cm „Philite" + strooistralenrooster. Focusafstand: 90 cm.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ties behoefde te worden gehouden, zou de 1000-voudige helderheidsversterking een verbetering van het minimaal waarneembare contrast bij gegeven detailafmeting met een veel grotere factor moeten opleveren [4]). Dit zou inderdaad het geval zijn als de primaire opwekking van licht in het scherm niet door röntgenstralen, maar door een veel groter aantal energie-armere quanta zou worden veroorzaakt.

In *fig. 2* zijn de aantallen quanta gegeven voor de röntgencamerafoto, zonder en met beeldversterker. Hier wordt de eenheid van tijd niet gegeven door de vaste waarde van 0,2 sec, maar bepaald door de opnameduur, omdat de fotografische emulsie alle straling tijdens de opname accumuleert. Bij het bekijken van de foto (twee laatste punten in fig. 2), hebben wij weer te maken met de 0,2 sec accumulatietijd van het oog.

De röntgencamerafoto zonder beeldversterker is in het geval van fig. 2 opgenomen met behulp van een lichtsterke spiegeloptiek. Ten gevolge van de kleine openingsverhouding van de optiek aan de voorwerpszijde wordt slechts een kleine fractie (ca. 0,4%) van het licht van het röntgenscherm nuttig gebruikt. Om één korrel van de filmemulsie ontwikkelbaar te maken, moeten in het röntgenscherm gemiddeld ca. 70 röntgenquanta worden geabsorbeerd; het aantal zilverkorrels bepaalt dus de theoretische contrastgrens. Hoe de fluctuaties in zwarting samenhangen met de relatieve standaardfluctuatie in het aantal korrels per objectdetail, is niet quantitatief bekend. Waarschijnlijk hangt dit nog samen met de gradatie (γ) van de emulsie. Het is echter plausibel dat bij niet te grote zwartingen de zwartingsfluctuaties afnemen met toenemend aantal korrels per detail (afnemende korrelafmeting).

Bij de camerafotografie met beeldversterker wordt in het geval van fig. 2 het kijkscherm met behulp van een optiek ongeveer 1,4 maal vergroot afgebeeld op de film. Evenals bij de doorlichting geeft de helderheidsversterking hier een compensatie voor het lichtverlies bij de optische afbeelding. Het resultaat is dat ieder geabsorbeerd röntgenquantum verscheidene korrels (ca. 20) van de fotografische emulsie ontwikkelbaar maakt. Evenals bij de beeldversterkerdoorlichting, is dus het aantal in het röntgenscherm van de beeldversterker geabsorbeerde röntgenquanta bepalend voor de theoretische contrastgrens.

Bij de röntgenfoto op ware grootte wordt practisch al het licht van het „scherm" (de gebruikelijke versterkingsfoelies) nuttig gebruikt, doordat de film in contact is met het scherm. Metingen van aantallen quanta hebben aangetoond, dat het kleinste aantal (dus de fluctuaties) in dit geval wordt bepaald door het aantal in het scherm geabsorbeerde röntgenquanta.

Met behulp van de gemeten aantallen quanta kunnen wij nu, als wij een zekere waarde voor k aannemen, $C_{min} = k / \sqrt{N_{min}}$ voor elke diameter van het objectdetail berekenen.

Experimentele resultaten

De volgende stap is, experimenteel na te gaan in hoeverre de aangegeven theoretische grens van de waarneembaarheid in werkelijkheid benaderd wordt.

Dergelijke metingen worden uitgevoerd met een zg. röntgenfantoom, reeds eerder in dit tijdschrift beschreven [5]). Voor onze metingen hebben wij gebruik gemaakt van een enigszins gewijzigde uitvoering van dit fantoom, ons ter beschikking gesteld door Prof. Dr. G. C. E. Burger. In principe bestaat dit fantoom uit een aantal platen van „Philite", een kunsthars, in één waarvan (de zg. fantoomplaat) een aantal cylindrische gaten met verschillende diameter en diepte geboord zijn. Met de verschillen in diepte corresponderen absorptieverschillen en dus intensiteitsverschillen van de door de plaat komende röntgenstraling. (Men spreekt hier vaak

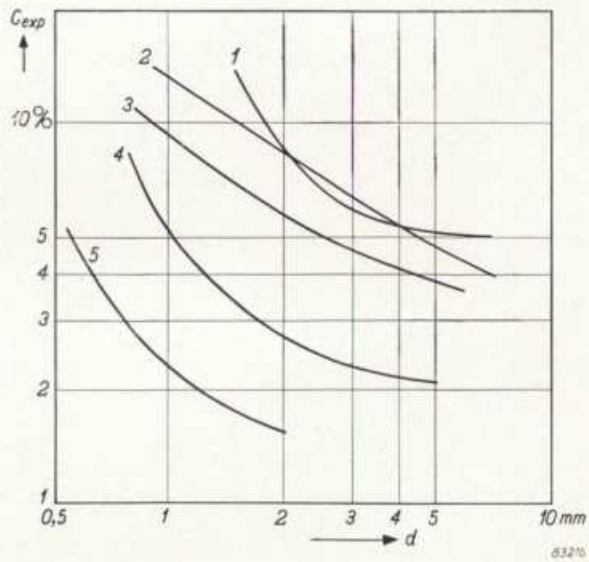


Fig. 3. Voorbeeld van experimenteel verkregen contrast-detail-diagrammen.
Object: 8 cm „Philite" + strooistralenrooster.
Focusafstand: 90 cm.
1: Doorlichting zonder beeldversterker; 75 kV; 4 mA
2: Doorlichting met beeldversterker; 67 kV; 0,1 mA
3: Doorlichting met beeldversterker; 67 kV; 0,2 mA
4: Doorlichting met beeldversterker; 67 kV; 3 mA
5: Röntgenfoto op ware grootte op „Curix"; 67 kV; 3 mAs.

[4]) H. R. Blackwell, J. Opt. Soc. Amer. **36**, 624, 1946.

[5]) G. C. E. Burger, Fantoomproeven met röntgenstralen, Philips techn. T. **11**, 295-302, 1949.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van „röntgencontrast", welke term wij echter in dit verband liever vermijden.) Door een aantal waarnemers worden bij de doorlichting of op een röntgenfoto van het fantoom die gaten aangegeven welke nog juist te zien zijn. De diameter en de diepte van de nog juist zichtbare gaten verschaffen ons bijv. de krommen van *fig. 3* en *4*. Deze krommen geven dus de grens tussen nog juist waarneembare en niet meer waarneembare contrasten (C_{exp}), als functie van de diameter van het objectdetail.

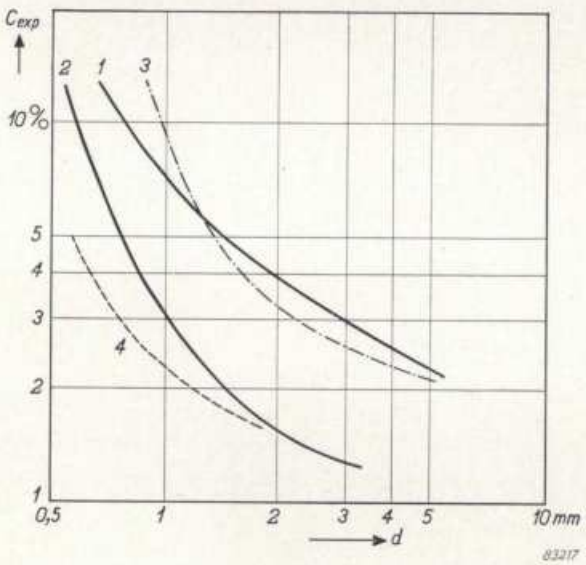


Fig. 4. Voorbeeld van experimenteel verkregen contrast-detail-diagrammen, analoog aan fig. 3.
Object: 8 cm „Philite" + strooistralenrooster.
Focusafstand: 90 cm.
1: Röntgencamerafoto met BV, „Fluorapid"; 67 kV; 0,2 mAs
2: Röntgencamerafoto met BV, „Micro-File"; 70 kV; 5 mAs
3: Röntgencamerafoto zonder BV, „Scopix"; 67 kV; 14 mAs
4: Röntgenfoto op ware grootte op „Curix"; 67 kV; 3 mAs.

Vergelijking tussen experiment en theorie

Uit de figuren 3 en 4 blijkt al direct dat de gemeten krommen niet recht zijn, zoals uit de theorie zou volgen. De theorie geldt echter voor een ideale apparatuur; met onvolkomenheden, zoals de altijd optredende onscherpte in fluorescentieschermen, het contrastverlies in de beeldversterker, de drempelwaarde voor de contrastgevoeligheid van het oog etc., wordt in de fluctuatietheorie geen rekening gehouden.

De meeste fluorescentieschermen bijv. hebben een onscherpte groter dan 0,4 mm, en details beneden een zekere afmeting, afhankelijk van het contrast, zullen daardoor niet waargenomen kunnen worden.

Hoe staat het nu met niet te kleine objectdetails, bijv. met een diameter van 2 mm? Als wij voor een aantal gevallen nagaan hoeveel maal het experimenteel gevonden grenscontrast C_{exp} meer bedraagt dan het fluctuatiecontrast C_{fluct}, dan vinden wij hiervoor geen constante factor (zie laatste kolom van *tabel I*). De uiterste waarden treden op bij de beeldversterkerdoorlichting met geringe röntgenintensiteiten (2,2) en bij de beeldversterkerfoto op ongevoelige film (11,5); voor de beeldversterkerfoto op gevoelige film vindt men een tussengelegen waarde (4,5). Een grote verhouding C_{exp}/C_{fluct} betekent dat de experimenteel gevonden waarneembaarheid voor een rond detail van 2 mm vrijwel niet door de quantafluctuaties wordt bepaald, maar bijna uitsluitend door onvolkomenheden van de apparatuur. Naarmate minder röntgenquanta gebruikt worden (zoals in het geval van de beeldversterkerfoto op gevoelige film), zal C_{fluct} toenemen en de verhouding C_{exp}/C_{fluct} kleiner worden. Een verhouding $C_{exp}/C_{fluct} = 4{,}5$ moet al vrij dicht bij de optimale waarde liggen. De laagste waarde voor de verhouding C_{exp}/C_{fluct}, nl. 2,2, vinden wij bij de beeldversterkerdoorlichting met kleine röntgenintensiteiten. Hieruit mogen wij nog niet concluderen dat k gelijk is

Tabel I. Minimaal waargenomen contrast C_{exp}, minimaal aantal quanta $\bar{N}_{min}$, het hieruit berekende fluctuatiecontrast C_{fluct} en de verhouding C_{exp}/C_{fluct}, voor de waarneming van een detail van 2 mm doorsnede in een 8 cm dik fantoom van „Philite", volgens verschillende methodes.

Methode	kV	mA of mAs	C_{exp} %	$\bar{N}_{min}$	C_{fluct} %	$\frac{C_{exp}}{C_{fluct}}$
Doorlichting zonder BV	75	4	8	$1{,}2 \cdot 10^3$	2,9	2,8
Doorlichting met BV	67	0,2	4,4	$2{,}5 \cdot 10^3$	2,0	2,2
Röntgencamerafoto met BV op 35 mm-film „Fluorapid"; optiek $d/f = 1:4{,}5$	67	0,2	4	$12{,}5 \cdot 10^3$	0,89	4,5
Röntgencamerafoto zonder BV; spiegeloptiek	67	14	3,25	$30 \cdot 10^3$	0,58	5,6
Doorlichting met BV	67	3	2,8	$37{,}5 \cdot 10^3$	0,52	5,4
Röntgencamerafoto met BV op 35 mm-film „Micro-File"; optiek $d/f = 1:2$	67	1,5	1,55	$100 \cdot 10^3$	0,31	5,0
Röntgencamerafoto met BV op 35 mm-film Pan F; optiek $d/f = 1:4{,}5$	67	2	2,6	$125 \cdot 10^3$	0,28	9,3
Röntgenfoto op ware grootte	67	3	1,5	$450 \cdot 10^3$	0,15	10,0
Röntgencamerafoto met BV op 35 mm-film „Micro-File"; optiek $d/f = 1:4{,}5$	67	8	1,6	$540 \cdot 10^3$	0,14	11,5

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

aan 2,2, met andere woorden dat het te allen tijde mogelijk is een röntgencontrast waar te nemen gelijk aan 2,2 maal de grootte van de gemiddelde relatieve standaardfluctuatie. Bij langere waarnemingstijden nl. neemt de kans op een toevallig geringe fluctuatie toe en is het dus mogelijk op dat moment een contrast waar te nemen dat kleiner is dan zou corresponderen met de formule $C_{min} = k/\sqrt{N_{min}}$ [6]).

Op grond van bovenstaande overwegingen zijn wij van mening dat $k = 3$ een goede benadering is voor de optimale waarde.

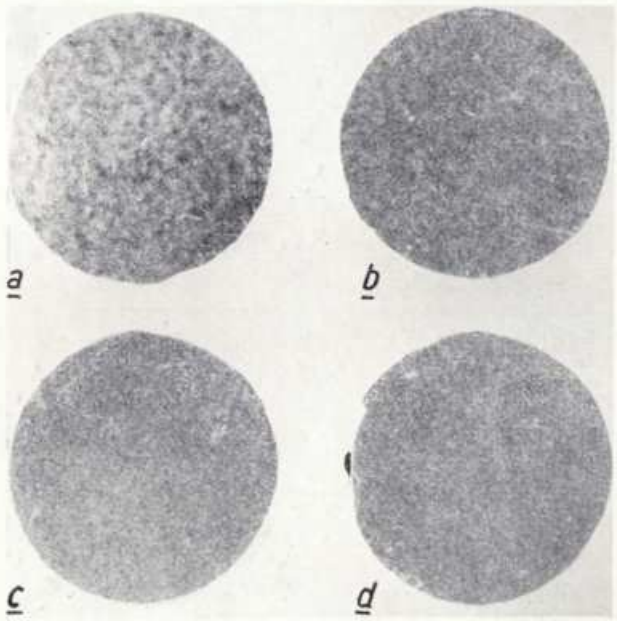
Bij de röntgenfoto op ware grootte en bij de beeldversterkerfoto op fijnkorrelige film vinden wij grote waarden voor C_{exp}/C_{fluct} (>10). Dit betekent dat hier de waarneembaarheid voor een rond detail van 2 mm vrijwel niet door de quantafluctuaties wordt bepaald, maar bijna uitsluitend door onvolkomenheden van de apparatuur. Deze zijn moeilijk te verbeteren, maar niet van principiële aard.

Directe zichtbaarheid van de quantafluctuaties

Een fraaie bevestiging van de bovenstaande beschouwingen verkrijgt men doordat de röntgenquantafluctuaties ook op directe wijze in het röntgenbeeld tot uiting komen. Bij de doorlichting met beeldversterker bij niet te grote röntgenintensiteiten valt het op, dat het beeld een zekere onrust, „gewriemel", vertoont. Dit scintilleren hangt ten nauwste samen met het betrekkelijk geringe aantal röntgenquanta dat voor de vorming van het lichtsterke beeld gebruikt wordt. Hoe groter de versterkingsfactor van een beeldversterker is, des te duidelijker zijn de fluctuaties door het oog waar te nemen, speciaal wanneer men het kijkscherm met een nog sterkere vergroting dan normaal waarneemt.

Wij hebben gezien dat bij een met de beeldversterker gemaakte foto er in het algemeen een groot verschil bestaat tussen de experimentele grens van de waarneembaarheid en de door de quantafluctuaties bepaalde theoretische grens (grote verhouding C_{exp}/C_{fluct}). Het is dan ook niet te verwachten dat de fluctuaties op deze foto's rechtstreeks zichtbaar zullen zijn. Maken wij echter een beeldversterkerfoto met nog veel minder röntgenstraling, door een lichtsterkere optiek te gebruiken, dan is er wel degelijk iets te merken van de fluctuaties in de aantallen geabsorbeerde röntgenquanta. *Fig. 5* geeft hiervan een voorbeeld. Hier zijn vier reproducties gegeven van gedeelten uit beeldversterkerfoto's. Het verschil tussen deze vier beelden is, dat de hoeveelheid röntgenstraling per foto verschilde in de verhouding $a : b : c : d := 1 : 5 : 32 : 160$, doordat het lenssysteem overeenkomstig was gediafragmeerd.

Er is een duidelijk verschil tussen de foto's te zien. Foto *a* bijv., opgenomen met de volle opening van de optiek, vertoont een veel grovere structuur dan de andere. Ten gevolge van de grote versterking



82303

Fig. 5. Zichtbare röntgenfluctuaties in foto's opgenomen met behulp van de beeldversterker. De foto's zijn gemaakt met verschillende diafragma-opening, afnemend in de volgorde $a \rightarrow d$.

van de beeldversterker en gebruikmaking van de volle lensopening werden in het geval van foto *a* weinig röntgenquanta gebruikt en er is een sterke plaatselijke fluctuatie in de zwarting, want ieder röntgenquantum geeft een hoopje korrels. Foto *d*, gemaakt met een sterk gediafragmeerde lens, had veel meer röntgenquanta nodig om ontwikkelbare korrels te vormen. Omdat dus het aantal korrelhoopjes afkomstig van de röntgenquanta op foto *a* belangrijk kleiner is dan het aantal op foto's *c* en *d*, en daardoor de relatieve statistische fluctuatie in het aantal hoopjes groter is, wijkt de korrelverdeling op foto *a* veel meer af van een homogene verdeling dan bij foto's *c* en *d*. Met een fijne gieter sproeit men gelijkmatiger dan met een paar glazen water.

Principiële en practische voordelen bij het gebruik van de beeldversterker

Uit de fig. 1 en 2 blijkt duidelijk welke voordelen het gebruik van de beeldversterker kan bieden bij de doorlichting en bij de röntgencamerafotografie. Zonder beeldversterker worden bij deze methodes

[6]) Bij röntgenfoto's kan men nooit ervan profiteren dat zich toevalligerwijze eens een gunstige fluctuatietoestand voordoet, omdat dit toch nooit voor het gehele veld het geval zou zijn.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de in het röntgenscherm geabsorbeerde röntgenquanta maar zeer onvolledig gebruikt, gemiddeld slechts 1 op de 100, waardoor de relatieve waarde van de fluctuaties ca. 10 maal groter is dan die welke inhaerent is aan de geabsorbeerde röntgenquanta. Dientengevolge is de waarneembaarheid principieel slechter dan bij gebruik van de beeldversterker, waarbij alle geabsorbeerde röntgenquanta benut worden. Ieder in het scherm geabsorbeerd röntgenquantum geeft aanleiding tot een drievoudige prikkel in het netvlies en tot de ontwikkeling van enige (20 à 30) zilverkorrels, afhankelijk van de filmsoort en de openingsverhouding van de optiek.

Uit de gevonden waarden van C_{exp}/C_{fluct} kunnen wij enige conclusies trekken, welke gelden voor het waarnemen van niet te kleine details (enige mm groot) bij zwakke contrasten.

Bij de doorlichting met de beeldversterker met niet te grote röntgenintensiteiten wordt de theoretische grens van de waarneembaarheid experimenteel reeds dicht benaderd. Door instrumentele verbeteringen is dan bij de gebruikelijke waarnemingstechniek niet veel winst meer te verwachten.

Bij de beeldversterkerfoto's, gemaakt met behulp van een lichtsterke optiek op gevoelige 35 mm-film, wordt de grens van de waarneembaarheid in de practijk ook reeds door de röntgenquantafluctuaties bepaald. Dit betekent dat meer informatie slechts verkregen kan worden door een grotere röntgendosis te gebruiken. Men kan dit bijv. doen door een fijnkorreliger film te nemen; uiteindelijk wordt men dan beperkt door de onvolkomenheden van de apparatuur.

Uit de figuren 3 en 4 volgen ten slotte nog enkele getallen waaruit de voordelen van het gebruik van de beeldversterkermethode blijken. Men ziet dat voor waarneming met de beeldversterker van gelijke grenscontrasten als bij de doorlichting zonder beeldversterker, slechts $^1/_{40}$ van de röntgendosis nodig is. Bij de beeldversterkerfoto op 35 mm-film is de röntgendosis een factor 70 kleiner dan bij de röntgencamerafoto op 70 mm-formaat zonder beeldversterker. In beide gevallen wordt dan fotografisch materiaal van dezelfde gevoeligheid gebruikt en de röntgenbeelden worden ca. 7 × verkleind op de film afgebeeld. De waarneembaarheid van details op beide foto's is niet veel verschillend. Dit resultaat is zeer belangrijk voor het maken van cinéfilms van bewegende organen met behulp van de beeldversterker.

Bij gebruik van zeer fijnkorrelig filmmateriaal kunnen met de beeldversterker 35 mm-foto's worden gemaakt van een kwaliteit welke die van een röntgenfoto op ware grootte benadert, en indien men een lichtsterke optiek gebruikt, is de benodigde röntgendosis daarbij nog enige malen kleiner.

III. OPTISCHE HULPMIDDELEN BIJ DE BEELDVERSTERKER

door P. M. van ALPHEN. 621.386.8:616-073.75:621.383.8:535.82

Voor het bekijken van een röntgenbeeld op een doorlichtingsscherm zijn geen optische hulpmiddelen nodig en gebruikelijk. Om de details van het beeld te kunnen waarnemen, moet het oog van de waarnemer goed aan de lage helderheid aangepast zijn.

Bij de röntgenbeeldversterker is de situatie juist omgekeerd. Het daarin gevormde zichtbare beeld is wel helder genoeg om het bij normale kamerverlichting te bekijken, maar het is door de electronenoptische verkleining zo klein geworden dat er optische instrumenten nodig zijn om de details te kunnen waarnemen.

Niet alleen bij het bekijken, ook bij het fotograferen moet men bij de beeldversterker anders te werk gaan. De spiegelcamera, welke door zijn grote openingsverhouding zo uitstekend geschikt is voor het opnemen van het gewone, lichtzwakke, röntgenschermbeeld, is niet zonder veranderingen bruikbaar voor het vastleggen van het kleine beeldje van een beeldversterker.

Het probleem om een klein voorwerp vergroot waar te nemen of om het te fotograferen, is niet nieuw en men kent in de optica verschillende middelen om dit doel te bereiken. Loupe, microscoop, kijker, kleinbeeldcamera enz. zijn bekende instrumenten en van ieder bestaat er een reeks verschillende uitvoeringen. Het lijkt ons echter gewenst de algemene gezichtspunten te bespreken waaraan het optische instrument moet voldoen dat men voor de beeldversterker wil gebruiken. Hierbij zullen ook diverse oplossingen ter sprake komen die voor de Philips beeldversterker zijn toegepast.

Enkele grootheden en begrippen uit de fotometrie

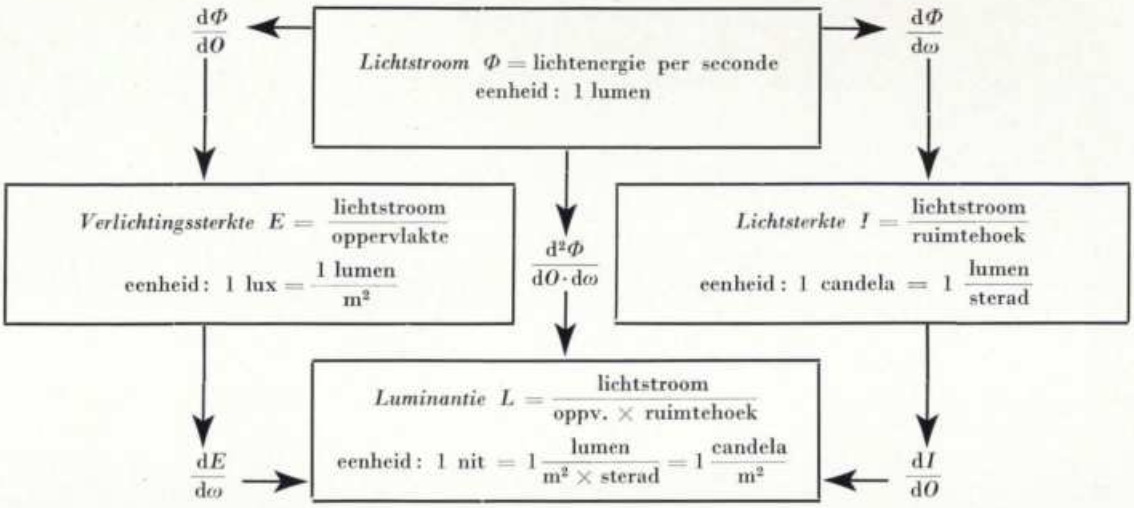
Voordat we met bovengenoemde bespreking aanvangen, is het nuttig een toelichting te geven bij de grootheden welke in gebruik zijn om licht te meten, grootheden welke door hun namen steeds weer verwarring stichten.

De lichtbron straalt energie uit; dat gedeelte van

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tabel I. Schema van het onderlinge verband der lichtgrootheden.


dΦ/dO
Lichtstroom Φ = lichtenergie per seconde
eenheid: 1 lumen
dΦ/dω
Verlichtingssterkte E = lichtstroom / oppervlakte
eenheid: 1 lux = 1 lumen / m²
d²Φ/dO·dω
Lichtsterkte I = lichtstroom / ruimtehoek
eenheid: 1 candela = 1 lumen / sterad
Luminantie L = lichtstroom / oppv. × ruimtehoek
eenheid: 1 nit = 1 lumen / m² × sterad = 1 candela / m²
dE/dω
dI/dO

deze stroom van energie waarvan de golflengte in het zichtbare deel van het spectrum gelegen is en zoals deze door het menselijk oog gezien kan worden, noemt men de lichtstroom (eenheid: de lumen). Deze lichtstroom wordt gevormd door het licht dat naar alle richtingen gaat en van het gehele oppervlak van de lichtbron komt. Voor bepaalde problemen wil men weten hoe deze lichtstroom is verdeeld over de verschillende richtingen van de ruimte; in andere gevallen interesseert men zich ervoor hoe deze lichtstroom over de verschillende plaatsen van het oppervlak van de lichtbron of van de lichtontvanger verdeeld is. Men zal dus dikwijls de grootheid: lichtstroom (in de gehele ruimtehoek) per eenheid van oppervlakte nodig hebben, maar in een ander geval zal men de lichtstroom (van het gehele oppervlak) in een bepaalde richting, dus per eenheid van ruimtehoek, willen kennen. Men kan zelfs een stap verder gaan en de lichtstroom willen opgeven welke van een klein oppervlakte-elementje in bepaalde richtingen wordt uitgezonden. Met andere woorden, men kan de gehele lichtstroom opdelen naar oppervlakte, richting, of oppervlakte èn richting. De grootheden die men aldus krijgt, hebben afzonderlijke namen gekregen: het zijn resp. de verlichtingssterkte (of ook kort: verlichting), de lichtsterkte en de helderheid of luminantie. Een en ander is in *fig. 1* en *tabel I* zeer schematisch weergegeven.

Wat is nu de invloed van optische hulpmiddelen zoals lenzen en spiegels op deze grootheden? De optiek wekt geen licht op, het is daarom duidelijk dat de lichtstroom niet groter kan worden en dat hij dus, indien er geen absorptie in de optiek optreedt, constant blijft. Geheel anders is het met de verlichting en de lichtsterkte. Met behulp van een lens of spiegel kunnen we de lichtstroom op bepaalde plaatsen (dus oppervlakten), of in bepaalde richtingen (dus ruimtehoeken), concentreren. Zowel lichtsterkte als verlichting kunnen daarbij sterk veranderen [1]). Met de helderheid is dit echter niet

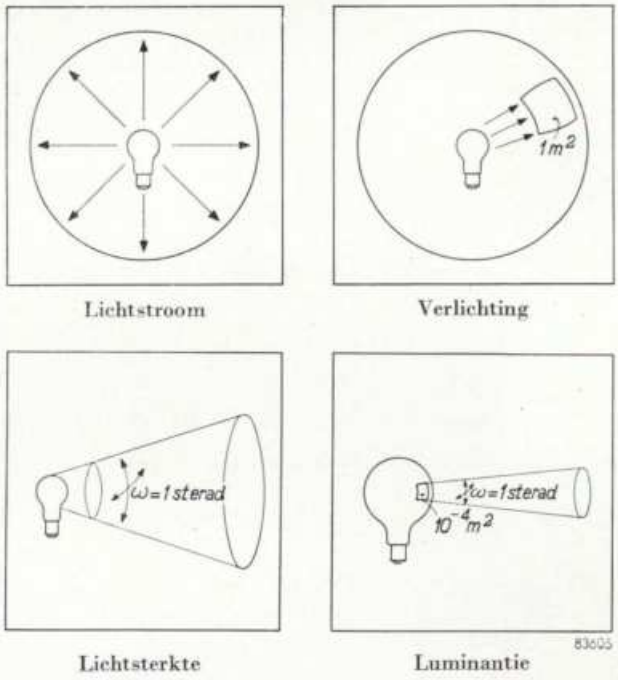


Fig. 1. De vier fotometrische lichtgrootheden. De lichtstroom bestaat uit al het licht dat door de gehele lamp wordt uitgezonden. De verlichting is de lichtstroom welke op 1 m² valt. De lichtsterkte is de lichtstroom die de lamp in de eenheid van ruimtehoek uitstraalt. Omdat dit licht bij vrije straling in deze ruimtehoek blijft, is de lichtsterkte onafhankelijk van de afstand tot de lichtbron. De luminantie (helderheid) is de lichtsterkte van één oppervlakte-eenheid (m² of 10^{-4} m²) van de lichtbron, en dus de lichtstroom per oppervlakte-eenheid en per eenheid van ruimtehoek.

[1]) Het eenvoudigste voorbeeld hiervan is een kaars met een vlakke spiegel erachter. De lichtsterkte is nu twee kaars geworden, maar de ruimtehoek waarin men deze lichtsterkte heeft, is tot 2π, de halve bol, gereduceerd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

het geval. Doordat de lichtstroom per eenheid van oppervlakte en ruimtehoek samenhangt met de stralingsdichtheid, is dit een eigenschap van de lichtbron, welke door de optische hulpmiddelen niet vergroot kan worden. Zou dit wel het geval zijn, dan had men de vreemde situatie dat de energie, in casu het licht, zich van een plaats met geringe stralingsdichtheid naar een plaats met grote stralingsdichtheid zou bewegen. Uit de omkeerbaarheid van de lichtstralengang kan men derhalve direct inzien dat bij afwezigheid van absorptie de luminantie niet verandert.

Ten slotte nog iets over het verband tussen de lichtstroom Φ en de luminantie L (*fig. 2*). Het is duidelijk dat bij gegeven waarde van de luminantie

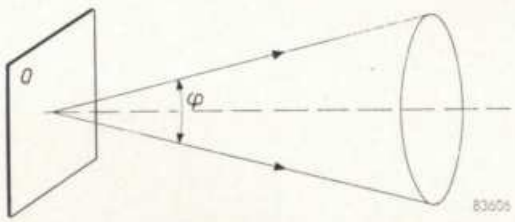


Fig. 2. De lichtstroom Φ, in een hoek φ uitgestraald door een volgens de wet van Lambert stralend oppervlak ter grootte O en met luminantie L, is $\pi LO \sin^2 \frac{1}{2}\varphi$.

de lichtstroom toeneemt met de beschouwde ruimtehoek en de oppervlakte O. Dit geldt zowel voor een lichtgevend als voor een ontvangend oppervlak. Wel moet men bedenken dat L nog van de richting afhankelijk kan zijn. Voor het eenvoudigste geval van een straler met een in alle richtingen constante luminantie L, een zg. „Lambertstraler", wordt de lichtstroom gegeven door:

$$\Phi = \pi LO \sin^2 \tfrac{1}{2}\varphi, \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

waarbij φ de tophoek is van de kegel waarbinnen de beschouwde lichtstroom zich bevindt.

Toepassing op optische stelsels

Bovenstaande formule willen we voor een viertal gevallen nader beschouwen, nl.

1) het menselijk oog,
2) het fototoestel,
3) een willekeurig optisch stelsel,
4) de beeldversterker.

Bij het menselijk oog hangt de indruk die wij krijgen, af van de mate waarin de oogzenuw in het netvlies geprikkeld wordt. Dit zal door de opgevangen lichtstroom Φ bepaald worden, waarvoor verg. (1) ook geldt. De oppervlakte O van een netvlieselement mogen we hier als constant en onveranderlijk beschouwen. φ is de tophoek van de kegel waarvan de top zich op het netvlies bevindt en het grondvlak gevormd wordt door de pupil van het oog. Ook deze hoek heeft (bij voldoende helderheid) een constante waarde. De lichtindruk of subjectieve helderheid wordt dus geheel door de luminantie L bepaald. Maar stilzwijgend hebben we hierbij aangenomen dat inderdaad de kegel φ geheel met lichtstralen gevuld is, met andere woorden: dat onze oogpupil door het optische instrument waardoor wij kijken, geheel belicht wordt. De kleinste uittree-opening van de lichtbundel uit het optische instrument, de zg. uittreepupil, moet daartoe groter zijn dan de oogpupil. Deze laatste is bij kleine helderheden groter dan bij grote (*fig. 3*). Bij de constructie van het optische instrument dient men dus rekening ermede te houden in welk helderheidsgebied men ermee zal werken (dag- of nachtkijker).

Hoewel men bij een fototoestel eveneens kan zeggen dat de lichtstroom Φ van belang is, is deze uitspraak zonder meer niet duidelijk. Men zou kunnen denken aan de lichtstroom welke door de optiek van het fototoestel uit de straling van het voorwerp opgevangen en op de fotografische film geworpen wordt. Men moet dan nog vermelden op welke oppervlakte deze lichtstroom terechtkomt, want de noodzakelijke belichtingstijd van de film is kleiner naarmate de verlichtingssterkte $\Phi/O = \pi L \sin^2 \frac{1}{2}\varphi$ groter is. Nemen we L, de helderheid van het voorwerp, als gegeven aan, dan zijn we nog vrij om $\sin \frac{1}{2}\varphi$ zo groot mogelijk te kiezen. Is deze keuze gemaakt, doordat men bijv. een type lens met gegeven openingsverhouding gebruikt, dan is Φ/O en dus de belichtingstijd gegeven; deze verandert niet

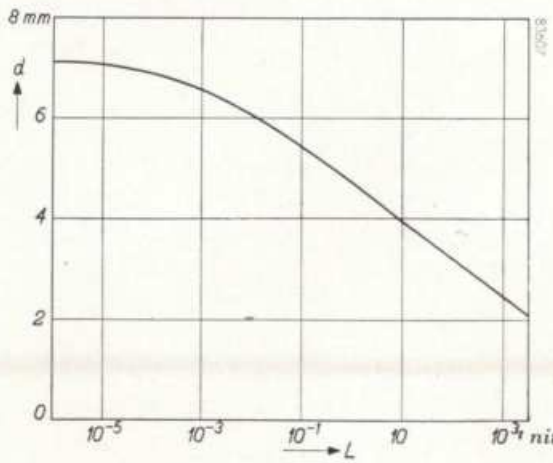


Fig. 3. Pupildiameter d van het menselijk oog als functie van de luminantie L.

meer met de keuze van de brandpuntsafstand, het formaat van de foto is echter evenredig met de brandpuntsafstand. Heeft men daarentegen een geval waarbij de lichtstroom vaststaat (bijv. doordat deze uit een ander optisch instrument komt),

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dan volgt uit het bovenstaande dat men de kortste belichtingstijd verkrijgt wanneer men het beeldformaat op de film zo klein mogelijk kiest. Men zal dan een fotolens met voldoende diameter en zo kort mogelijke brandpuntsafstand gebruiken.

Meestal is het probleem ingewikkelder dan in het bovenstaande voorgespiegeld wordt, doordat niet alleen de belichtingstijd, maar ook de scherpte, de korreligheid van de foto-emulsie, de prijs van de optiek en ook de verandering van $\sin \frac{1}{2}\varphi$ met de vergroting een rol spelen.

Passen we verg. (1) toe op een lens of optisch stelsel, dan geeft dit ons een eenvoudige afleiding van een formule welke in de optica soms naar Helmholtz, Huygens of Lagrange genoemd wordt, doch meestal als de sinusregel van Abbe bekend staat. Ziet men af van absorptie- en reflectieverliezen, dan is de lichtstroom Φ' welke in het beeld aanwezig is, gelijk aan de nuttige lichtstroom Φ welke door de lens wordt opgevangen (*fig. 4*). Men krijgt dus de betrekking:

$$\Phi = \Phi', \quad \text{of} \quad \pi L O \sin^2 \tfrac{1}{2}\varphi = \pi L' O' \sin^2 \tfrac{1}{2}\varphi'.$$

We weten dat de luminantie niet verandert, dus $L' = L$, zodat

$$\frac{O'}{O} = \frac{y'^2}{y^2} = \frac{\sin^2 \frac{1}{2}\varphi}{\sin^2 \frac{1}{2}\varphi'},$$

of

$$N = \frac{y'}{y} = \frac{\sin \frac{1}{2}\varphi}{\sin \frac{1}{2}\varphi'}, \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

als N de vergroting voorstelt en y' en y de resp. diameter van beeld en voorwerp. Lichttechnisch is dus een optische lens een transformator voor oppervlakte en openingshoek. Deze transformatie gebeurt altijd zodanig dat lichtstroom en luminantie onveranderd blijven; lichtsterkte en verlichtingssterkte kunnen wèl veranderen.

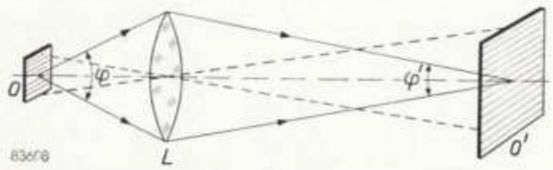


Fig. 4. Afleiding van de sinusregel. De lens L transformeert de oppervlakte O tot O' en de hoek φ tot φ'.

Ten slotte nog de beeldversterker. Hierin treden twee versterkingen op. Door de hoge spanning op de buis wordt aan de foto-electronen energie toegevoerd, en er wordt derhalve meer fluorescentielicht in het kijkscherm opgewekt dan oorspronkelijk bij de fotokathode aanwezig was. Dit noemen we de lumenversterking van de buis. Bovendien komt de versterkte hoeveelheid licht, door de N-voudige electronenoptische verkleining, van een kleinere fluorescentie-oppervlakte dan de fotokathode, waardoor men (in tegenstelling met optische verkleining) nog een extra luminantiewinst verkrijgt van N^2. Deze laatste factor levert het grootste aandeel van de totale luminantieversterking. Wel is duidelijk dat men nu achter deze buis nog zodanige optische hulpmiddelen moet toepassen dat men het N maal kleinere beeld zonder luminantieverlies kan bekijken.

Formule (2) geeft ons antwoord op de vraag, wat de maximale vergroting is welke men, met een optisch stelsel, kan toepassen zonder dat verlies aan helderheid optreedt. We weten uit het voorafgaande dat de diameter van de oogpupil (bijv. 8 mm) geheel met licht gevuld moet worden. De top van de kegel ligt in het te bekijken beeld, dus op de afstand van duidelijk zien, bijv. 25 cm. Hieruit volgt dat $\sin \frac{1}{2}\varphi = 4/250 = 0{,}016$. Het is duidelijk dat de tophoek van de door het instrument opgenomen lichtkegel maximaal 180° kan bedragen, in dat geval is $\sin \frac{1}{2}\varphi = 1$, en de grootste waarde van de vergroting waarbij de oogpupil geheel gevuld wordt, is dus $1{:}0{,}016 = 60\times$. Past men sterkere vergroting toe, dan zal de helderheid van het waargenomen beeld afnemen. In werkelijkheid vangt men veel minder dan een kegel van 180° op en is de waarde van de maximaal toelaatbare navergroting dienovereenkomstig minder.

We willen hieronder een aantal optieken bespreken en de argumenten vermelden welke bij hun toepassing van belang zijn. Wel moeten we nadrukkelijk vermelden dat in deze bespreking een zeer voorname factor, nl. het gemak van de waarnemer, vrijwel geheel buiten beschouwing wordt gelaten. In de practijk zal men terecht een iets minder perfecte oplossing welke voor een gegeven doel gemakkelijk te hanteren valt, verkiezen boven een theoretisch juiste oplossing.

Optische hulpmiddelen bij doorlichting

Loupe

Het eenvoudigste hulpmiddel om het kleine beeldje op het kijkscherm van de beeldversterkerbuis waar te nemen, is de gewone loupe. Toch hebben wij dit tot nu toe niet gebruikt. Wil men nl. met beide ogen waarnemen, dan moet men de loupe als leesglas gebruiken. De vergroting is in dat geval tamelijk gering, zodat de electronenoptische verkleining in de beeldversterker ook niet te sterk zou mogen zijn. Wij hebben gezien dat de luminantieversterking, welke juist bij het visueel waarnemen zo belangrijk is, met het kwadraat van deze verkleining toeneemt. Een factor 4 in electronenoptische verkleining kost ons een factor 16 in luminantie.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Met een loupe voor één oog geplaatst, kan men voor het vereiste gezichtsveld van 14 mm veel sterkere vergrotingen bereiken. Oog en loupe moeten dan dicht bij het kijkscherm kunnen komen, en dat is niet altijd mogelijk.

Het hoofdbezwaar tegen het gebruik van de loupe is echter dat zij het beeld niet omkeert. Het electronenoptische systeem van de beeldversterker keert het beeld wel om. Gebruikt men een loupe om het beeldscherm te bekijken, dan ziet men dus het beeld van het voorwerp, in medische toepassingen, omgekeerd staan. Dit is voor de arts, die bij gewone doorlichting niet aan deze beeldomkeer gewend is, bijzonder storend. Het kan natuurlijk door het toepassen van beeldomkerende spiegels of prismasystemen wel verholpen worden, maar dan is de eenvoud verloren gegaan en bovendien kan men niet meer een sterk vergrotende loupe gebruiken, omdat er te weinig ruimte aanwezig is om genoemde prisma's of spiegels in de stralengang aan te brengen.

Microscoop

Het bovenstaande leidt tot de gedachte, de beeldomkeer door een lens te laten geschieden en dan dit omgekeerde optische beeld met een loupe te bekijken. Dit komt overeen met de bouw van een microscoop, waarbij het objectief als beeldomkerende lens en het oculair als loupe gebruikt wordt. Om weer de oorspronkelijke grootte te krijgen, moet het geheel ongeveer 10× vergroten, hetgeen bijv. met een oculair 5× en een objectief 2× bereikt kan worden. De diameter van de uittreepupil is afhankelijk van de apertuur van het microscoopobjectief, en deze is voor een dergelijk zwak objectief niet groot. In een door ons gebruikte microscoop bedroeg de numerieke apertuur 0,07 en had de uittreepupil een diameter van 4 tot 5 mm. Dit is kleiner dan de pupil van het aan donker geadapteerde oog en zou dus tot helderheidsverlies aanleiding kunnen geven. Door de versterkingsfactor van 1000× wordt echter, zoals in de practijk gebleken is, vrijwel nooit met een aan donker geadapteerd oog waargenomen.

Binoculaire microscoop

Het waarnemen met twee ogen is in het algemeen minder vermoeiend dan het beschouwen met één oog. Een binoculaire opzet voor een gewone microscoop, welke met een half doorlatende spiegel of prisma het beschikbare licht over de twee ogen verdeelt, willen we hier niet toepassen, omdat de luminantie hierdoor minstens tot de helft daalt. We zijn dus gedwongen om twee maal zoveel licht op te vangen en een objectief met zeer grote uittreepupil te kiezen, of, zoals bij de microscoop van Greenough, twee naast elkaar staande objectieven en oculairen te gebruiken. De in de handel zijnde microscopen van dit type bevatten meestal beeldomkerende prisma's van Porro en zijn dus voor ons doel minder bruikbaar. Begonnen werd daarom met twee monoculaire microscopen, onder een hoek van 18° naast elkaar geplaatst. Het is echter constructief nogal lastig om hierbij een aanpassingsmogelijkheid aan de individuele oogafstand (die bij mensen van 55 tot 75 mm varieert) te geven zonder dat gelijktijdig de scherpstelling beïnvloed wordt. Daarom is, hoewel dit enig lichtverlies veroorzaakt, de stralengang met behulp van prisma's geknikt; door draaiing om de optische as kan men nu de afstand tussen de oculairen veranderen, terwijl men met behulp van de instelling van ieder oculair afzonderlijk voor verschil in sterkte van de ogen kan compenseren. In *fig.* 5 ziet men een afbeelding van de zo verkregen binoculaire microscoop, gecombineerd met een fototoestel.

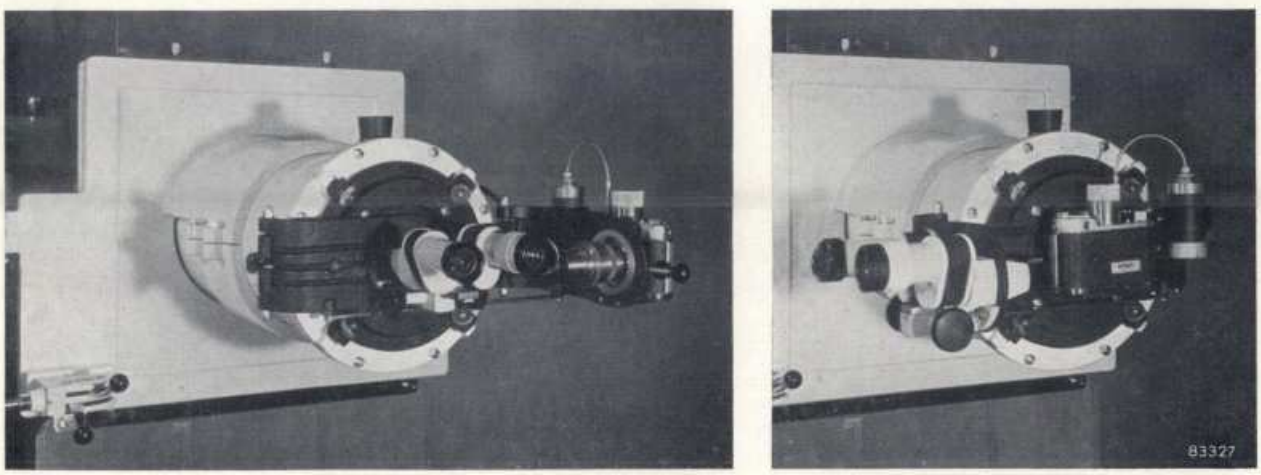


Fig. 5. Binoculaire microscoop en fototoestel, welke afwisselend voor de beeldversterker geklapt kunnen worden. Links is de microscoop, rechts het fototoestel in gebruik.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Beweeglijke opstelling

Bovengenoemde opstelling is zeer goed bruikbaar indien de beeldversterker in een vaste stand gebruikt wordt. Wil men echter de beeldversterker in allerlei richtingen in de ruimte bewegen, dan moet meer nadruk gelegd worden op het gemakkelijk voor het oog bereikbaar zijn van het oculair. In dit geval is een monoculair stelsel, dat dan door middel van beweegbare spiegels of prisma's gedraaid kan worden, te verkiezen. Men krijgt aldus

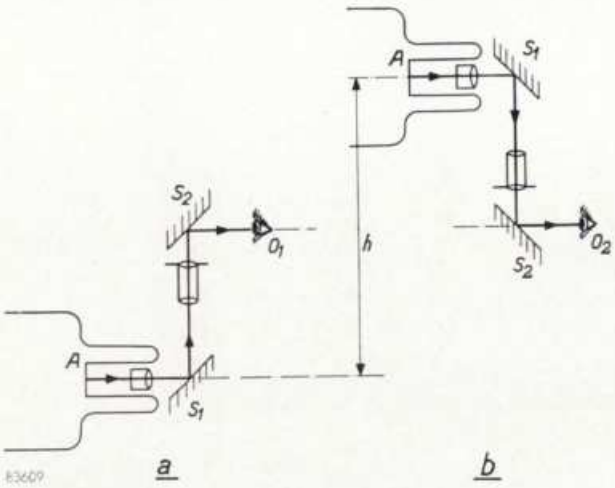


Fig. 6. Periscopische optiek. Door twee evenwijdige spiegels S_1 en S_2 wordt de stralengang geknikt, maar wordt de stand van het waargenomen beeld niet veranderd (*a*). Door de gehele inrichting draaibaar te maken om de richting AS_1 kan men de beeldversterker over een hoogte h verplaatsen (*b*) terwijl het oog O_1 of O_2 toch op dezelfde hoogte blijft. Door spiegel S_2 om een as loodrecht op het vlak van tekening te draaien, kan men ook de richting van waarnemen nog veranderen.

een geknikte opstelling. Een beschrijving van een dergelijke uitvoering vindt men in het volgende artikel (IV).

Een andere mogelijke opstelling is als volgt. Men gebruikt voor het bekijken de reeds beschreven monoculaire microscoop, maar brengt in de stralengang twee evenwijdige spiegels onder een hoek van ongeveer 45° aan. Deze spiegels geven een zijdelingse verplaatsing van het beeld, maar draaien het beeld niet (zie IV). Door nu de bekijkinrichting draaibaar te maken om de as van de beeldversterkerbuis, kan de inkijkhoogte aan de waarnemer aangepast worden (*fig. 6*). Is bovendien de tweede spiegel nog iets draaibaar om een as loodrecht op het vlak van tekening, dan kan ook de inkijkrichting aan een gemakkelijke stand van het hoofd worden aangepast.

Bij een beweeglijke opstelling is het soms onaangenaam om door een oculair te kijken. Men vreest steeds dat bij de beweging het oculair tegen het oog zal stoten. Men kan hieraan tegemoet komen hetzij door een geschikte steun voor het hoofd te construeren (zie IV), hetzij door het optische gedeelte zodanig te maken dat de plaats waar het oog zich moet bevinden om het gehele beeld waar te nemen, de zg. uittreepupil van het instrument, op enige afstand van de metalen delen in de ruimte is gelegen. Maakt men bovendien deze uittreepupil dan nog zo groot mogelijk, dan is het oog niet zo sterk aan één plaats gebonden.

Bij een dergelijke constructie is het niet zo heel gemakkelijk de juiste plaats voor het oog in de ruimte te vinden: wanneer het oog niet in de stralenbundel is, ziet men niets en weet men ook niet in welke richting men het hoofd moet verplaatsen om wel wat te zien. Wij hebben deze moeilijkheid als volgt opgelost (*fig. 7*). Op de plaats B waar zich het door het objectief L_1 gevormde beeld bevindt, brengt men een matglas in de stralengang. Dit glas is zodanig gematteerd dat er slechts geringe zijdelingse verstrooiing is; in de richting loodrecht op het oppervlak, dus in de asrichting van de opstelling, is de verstrooiing maximaal. Het matglas wordt bekeken door het oculair L_2, dat nu als loupe werkt. Kijkt men van opzij door dit vergrootglas L_2 naar het matglas, dan ziet men wel een beeld, maar door de geringe verstrooiing van het matglas is dit lichtzwak. Bij

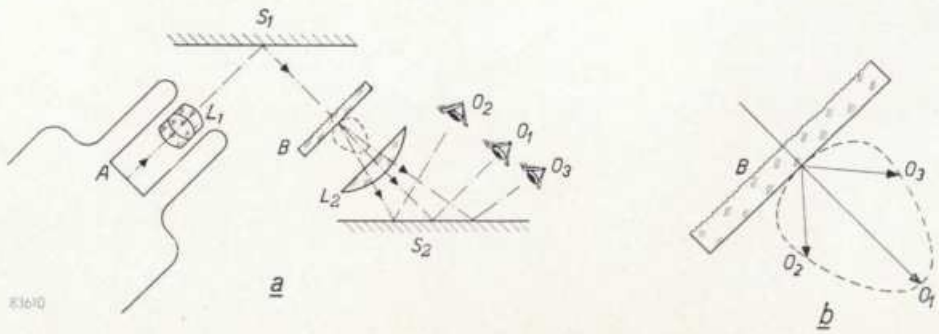


Fig. 7. Principe van de matglaszoeker (*a*). De lichtsterke lens L_1 projecteert een beeld van A via spiegel S_1 op het weinig verstrooiende matglas B. Dit matglasbeeld wordt via loupe L_2 en spiegel S_2 bekeken. Het oog zoekt de stand O_1 op, omdat dan de helderheid van het beeld maximaal is. Klapt men het matglas uit de stralengang weg, dan kan men in de stand O_1 het beeld met de volle helderheid zien. L_1 en L_2 werken dan als objectief en oculair van een microscoop.
De hulpfiguur (*b*) geeft het richtingsdiagram van de verstrooiing door het matglas.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

beweging van het hoofd echter merkt men, in welke richting men dit moet verplaatsen om de lichtsterkte te doen toenemen, en al zeer spoedig heeft men de plaats van maximale intensiteit gevonden. Dit is juist de optische asrichting van het instrument en op deze as is ook de bovengenoemde uittreepupil gelegen. Wanneer men nu het matglas uit de stralengang wegklapt, bevindt het oog zich in de stralengang en er is hoogstens nog een kleine verplaatsing vóór- of achteruit nodig om het gehele beeldvlak door de loupe L_2, die nu als oculair werkt, met de volle helderheid waar te nemen. Raakt men bij de beweging van de beeldversterker de juiste oogpositie kwijt, dan is het vóórklappen van het matglas voldoende om de juiste stand snel terug te vinden. In sommige gevallen, waar de röntgendosis dit toelaat, kan men ook het matglas blijvend ingeschakeld laten. Het waarnemen is dan zeer gemakkelijk, maar de helderheid en de scherpte zijn iets geringer.

Optiek voor het fotograferen

Wanneer men het beeld op het kijkscherm van de beeldversterkerbuis op de fotografische plaat wil vastleggen, kan men zijn keuze maken uit een zo groot aantal fotoapparaten dat enige algemene opmerkingen hierover wellicht nuttig zijn. Men dient eerst te overwegen of men telkens één enkele foto wil maken dan wel een serie foto's snel achter elkaar, of dat men zelfs, ter bestudering van bewegingen of plotselinge verschijnselen, over cinematografische opnamen wil beschikken. Staat dit vast, dan komt er nog de keuze van het formaat waarop men de opname zal doen, en met welke lenzen men zal werken. Hiermede hangt samen welk fotografisch materiaal men wil gebruiken, en zelfs hoe de gunstigste constructie van de beeldversterkerbuis is.

Vooreerst de keuze van het filmformaat. Gegeven de beeldversterkerbuis met een kijkscherm van bepaalde helderheid, zal men voor het fotograferen een optiek met zo groot mogelijk lichtvangend vermogen moeten gebruiken. Met de beste verkrijgbare optieken zal men een bepaald deel van de lichtstroom die van het kijkscherm uitgaat, vangen. Het zou dan onjuist zijn deze beschikbare lichtstroom over een grote oppervlakte van de fotografische film te verspreiden; men zal dus het filmformaat zo klein mogelijk kiezen, dwz. zo klein als het gevraagde detail en het scheidend vermogen van het fotografische materiaal toelaten. Het zijn trouwens ook juist de kleine beeldformaten waarvoor de meest lichtsterke optieken door de fotografische industrie zijn ontwikkeld en in de handel gebracht.

Wij hebben dan te maken met het probleem, een voorwerp (het kijkscherm) af te beelden op een formaat van ongeveer dezelfde afmetingen. De foto-optieken echter, en met name de voor ons in aanmerking komende, zijn ontwikkeld om een groot voorwerp verkleind af te beelden, dus om een afbeelding in het brandpunt te geven. Voor een afbeelding op ware grootte zijn ze minder geschikt, omdat de correctie van de beeldfouten dan niet meer in orde is [2]). Bovendien zijn bij de afbeelding 1:1 de voorwerps- en de beeldafstand ieder gelijk aan tweemaal de brandpuntsafstand, zodat de openingshoek $\frac{1}{2}\varphi$ half zo groot is als bij afbeelding in het brandpunt.

De vraag ligt voor de hand, of men aan dit bezwaar niet een heel eind tegemoet zou kunnen komen door het kijkscherm van de beeldversterkerbuis groter te maken, dus door een beeldversterker te construeren met een minder sterke electronenoptische verkleining. Het is zeer eenvoudig in te zien dat we daarmee de plank mis zouden slaan. Immers, we zouden dan het belangrijke voordeel van de helderheidswinst door de electronenoptische verkleining voor een deel prijsgeven. De gegeven lens (de optimale keuze van optiek en filmformaat wordt door de beschouwde verandering van de beeldversterker niet aangetast) zou dus wel in een situatie met een gunstiger hoek $\frac{1}{2}\varphi$ komen te werken, maar de helderheid L zou met het kwadraat van de kijkschermdiameter afgenomen zijn. In totaal (zie verg. 1) zou de film minder licht ontvangen.

Men kan het genoemde bezwaar echter op andere wijze ondervangen, nl. door de volgende eenvoudige kunstgreep. Wij gebruiken twee normale fotografische lensoptieken in tandem, dwz. met de kant van het oneindig verre beeld naar elkaar toegekeerd (zie *fig. 8*). Op deze wijze gebruiken we iedere lens voor zich op de juiste manier, terwijl de openingshoek twee maal zo groot is als bij afbeelding 1:1 met een enkele optiek.

Fig. 8. Twee lensoptieken in tandem: voor de afbeelding op ongeveer ware grootte worden twee optieken gebruikt, met voor de ene het voorwerp, voor de andere het beeld in het brandpunt. Tussen de twee optieken zijn de bij één beeldpunt behorende stralen evenwijdig.

Hoewel de stralengang tussen de twee optieken evenwijdig is, moeten deze toch zo dicht mogelijk tegen elkaar geplaatst worden, omdat anders voor de bundels welke scheef ten opzichte van de as verlopen, afsnijding (zg. vignettering) optreedt (zie *fig. 9*). Wil men met een dergelijk systeem toch iets verkleinen of vergroten, dan is dit mogelijk door de twee lenzen verschillende brandpuntsafstand te geven, bijv. $f_1 = 50$ en $f_2 = 60$ mm. De vergroting

[2]) Dit ziet men zeer duidelijk bij spiegels: voor oneindige voorwerpsafstand is de parabolische spiegel vrij van openingsfout, voor eindige afstand moet men de brandpunten van een ellips gebruiken.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

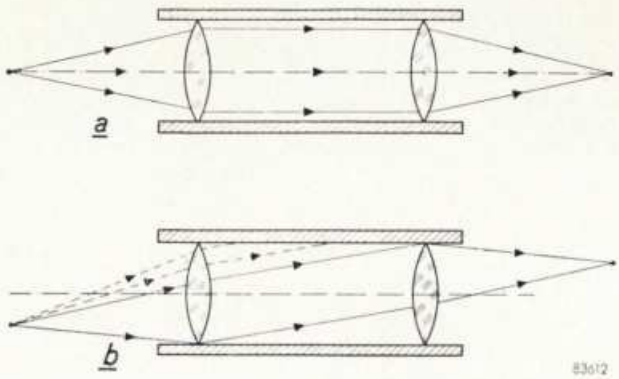


Fig. 9. Vignetteringseffect. Terwijl de bundel op de as, dus van het midden van het beeld, geheel wordt doorgelaten (*a*), worden de scheve bundels van de randen van het beeld sterk eenzijdig afgesneden (*b*).

is gelijk aan de verhouding van de brandpuntsafstanden, $N = f_1/f_2$.

Door een spiegelreflexcamera te gebruiken, kan men het te fotograferen beeld nog tot vlak voor de belichting controleren. Bij het filmen van het kijkschermbeeld moet men echter over een zoeker beschikken, om het bewegende beeld in het gezichtsveld te behouden. Vóór en achter de lens is hiervoor weinig ruimte. Door nu tussen de twee objectieven een klein spiegeltje of prisma te plaatsen, tapt men iets licht van het in het oneindige gelegen beeld af (*fig. 10*) en kan men dit direct of met behulp van een kijkertje bekijken tijdens het filmen van het beeld. Men kan ook de sluiter van de filmcamera spiegelend maken. Op de optiek voor het opnemen hebben deze maatregelen in het geheel geen invloed.

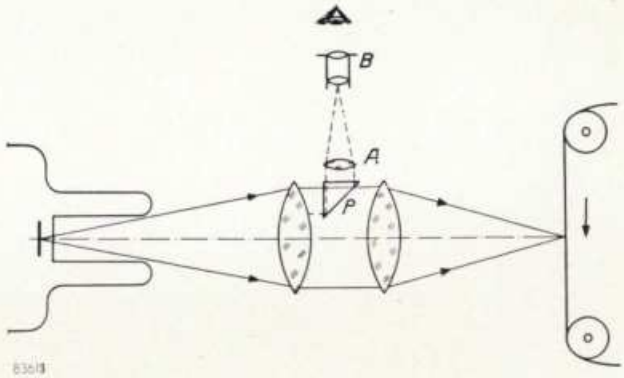


Fig. 10. Zoeker voor de tandem-lenscombinatie. Doordat het prisma *P* in de evenwijdige bundels geplaatst is, onderschept het slechts weinig licht. Met behulp van de kijker *AB* kijkt men via het prisma *P* naar het schijnbaar in het oneindige gelegen voorwerp.

IV. EEN INRICHTING VOOR GERICHTE RÖNTGENFOTO'S, VOORZIEN VAN EEN BEELDVERSTERKER MET PERISCOOP-OPTIEK

door H. VERSE *) en H. JENSEN **).

621.386.8:616-073.75:
621.383.8:535.82

De röntgenoloog die jarenlang met contactfoto's en doorlichtingsscherm gewerkt heeft, staat aanvankelijk enigszins onwennig tegenover datgene wat de beeldversterker hem toont. Het waargenomen beeld is helderder, maar ligt op een voor hem vreemde plaats. Door de grote helderheid ziet hij nu dat het beeld groen gekleurd is; tevens zijn voor zijn niet aan het donker geadapteerde oog de subjectieve contrasten geheel veranderd. Bovendien wordt hij door het betrekkelijk kleine beeldveld (13,5 cm) van de huidige beeldversterker belemmerd bij het vormen van een totale indruk van het onderzochte lichaamsdeel. Hij zal daardoor de behoefte kunnen voelen, naast de beeldversterker het grotere maar lichtzwakkere veld van het normale doorlichtingsscherm te gebruiken. Door de röntgenfabriek C. H. F. Müller te Hamburg is een diagnostiekapparaat gebouwd dat tracht aan deze wens tegemoet te komen[1]).

Er is nl. naar gestreefd, de röntgenoloog de mogelijkheid te geven afwisselend met een normaal doorlichtingsscherm of met de beeldversterker te werken, en tevens „gerichte" contactfoto's op het normale formaat of „röntgencamerafoto's", via de beeldversterker, op kleinbeeldformaat te maken. Deze mogelijkheid wordt hem gegeven bij een staande of een liggende patient en zelfs in alle tussengelegen standen. De opstelling vertoont een aantal constructieve bijzonderheden, en de beeldversterker is van een zeer speciale waarnemingsoptiek voorzien om het inkijken tijdens het kantelen van de patient zo gemakkelijk mogelijk te doen zijn.

Principe van de waarneming

De waarnemingsoptiek (*fig. 1*) is zodanig uitgevoerd dat de gebruiker zijdelings van de as van de röntgenbundel, dus van de patient, staat. Doordat de helling van het optische systeem door draaiing veranderd kan worden, kan zowel de kijkrichting als de inkijkhoogte aan het oog van de waarnemende arts aangepast worden. In optisch opzicht bestaat

*) C. H. F. Müller Aktiengesellschaft, Hamburg.
**) Allgemeine Deutsche Philips Industrie G.m.b.H., Hamburg.

[1]) H. Verse en H. Jensen, Ein Untersuchungsgerät mit Röntgenbildverstärker, Fortschr. Röntgenstrahlen **79**, 115-118, 1953.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

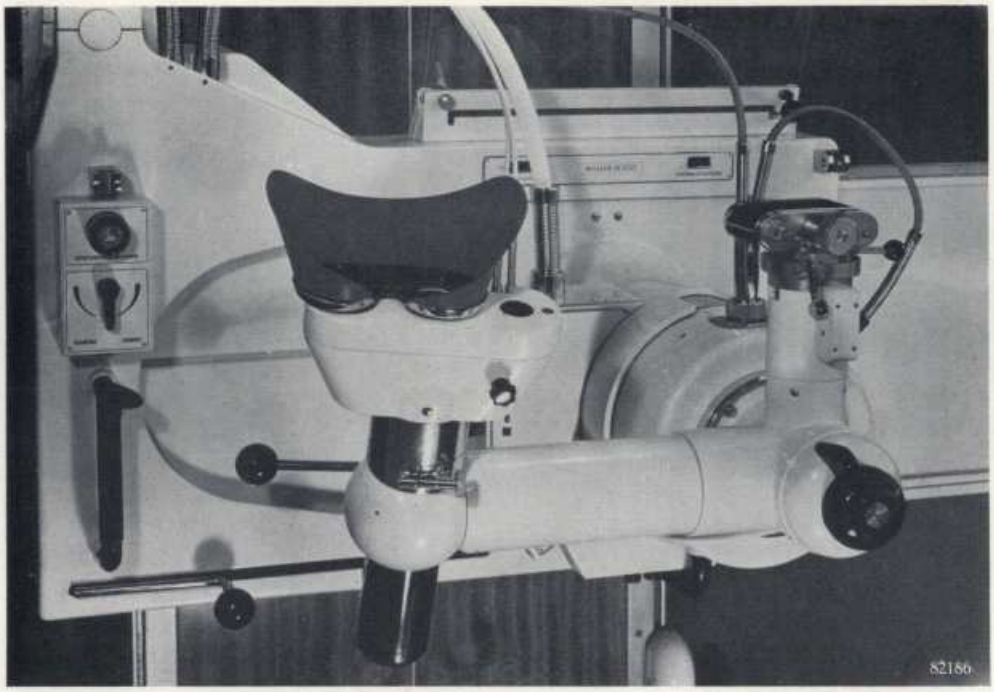


Fig. 1. Periscopische waarnemingsoptiek van het „Müller" diagnostiektoestel ZK 100. Rechts bevindt zich het omhulsel van de beeldversterkerbuis, waaraan de periscoop-optiek bevestigd is. Links ziet men een rubbersteun voor het voorhoofd met de opening van het oculair. De zwarte knop rechts onder schakelt de lichtstralengang om naar de erboven geplaatste camera.

de bekijkinrichting uit een geknikte draaibare microscoop met een optische vergroting van 10 maal, waardoorheen het beeld van de patient weer op natuurlijke grootte wordt waargenomen.

De lichtstralen welke van het kijkscherm *A* (*fig. 2*) van de beeldversterkerbuis komen, vallen op het objectief *O* en worden dan door middel van het dakkantprisma *P* in de dwarsliggende periscoopas *X*-*X'* afgebogen. Hier passeren ze het omkeerprisma *Z* (waarover hieronder nader) en vallen dan op de spiegel *S*, die de lichtbundel in de waarnemingsrichting van het oog *E* brengt. Het objectief *O* vormt bij *B* een vergroot beeld van het kijkscherm *A*. Dit in de ruimte gelegen beeld wordt door de loupe *L* nogmaals vergroot bekeken.

Nu is de uitvoering zodanig dat het laatste gedeelte van de optiek, nl. *S*-*L*, gedraaid kan worden om de richting van de periscoopas *X*-*X'*. Daardoor kan de röntgenoloog, bij verschillende standen van onderzoek van de patient, met één hand steeds de inkijkrichting *E*-*B* en de hoogte van de inkijkopening zo

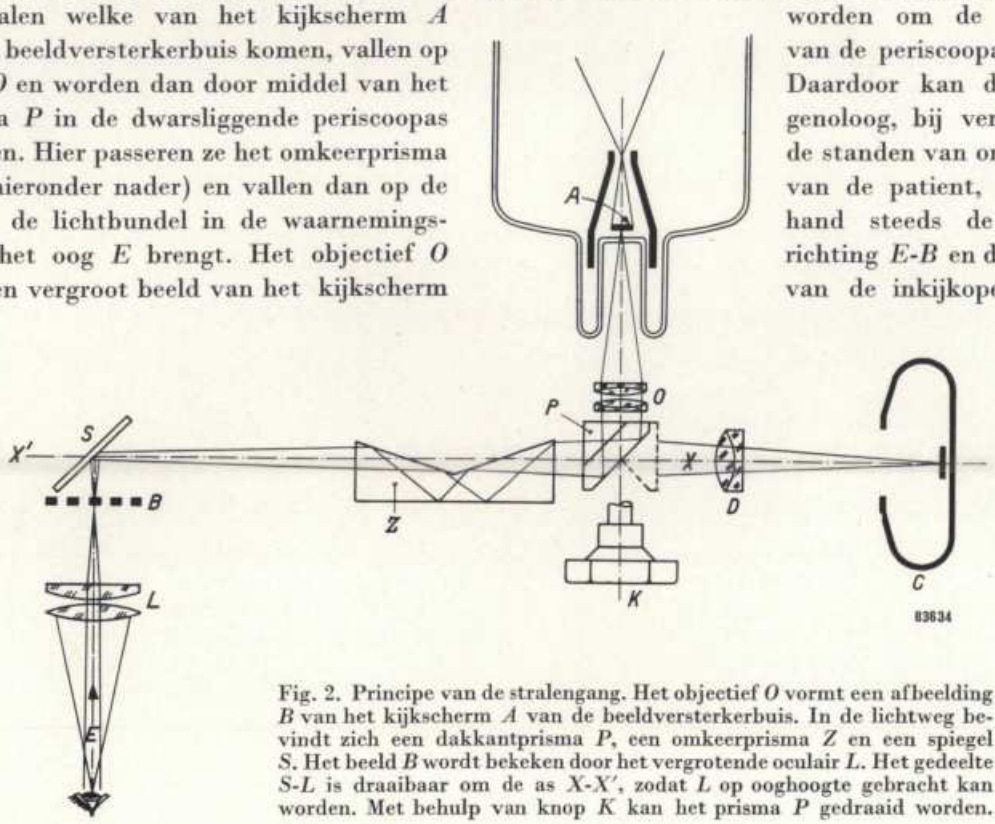


Fig. 2. Principe van de stralengang. Het objectief *O* vormt een afbeelding *B* van het kijkscherm *A* van de beeldversterkerbuis. In de lichtweg bevindt zich een dakkantprisma *P*, een omkeerprisma *Z* en een spiegel *S*. Het beeld *B* wordt bekeken door het vergrotende oculair *L*. Het gedeelte *S*-*L* is draaibaar om de as *X*-*X'*, zodat *L* op ooghoogte gebracht kan worden. Met behulp van knop *K* kan het prisma *P* gedraaid worden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

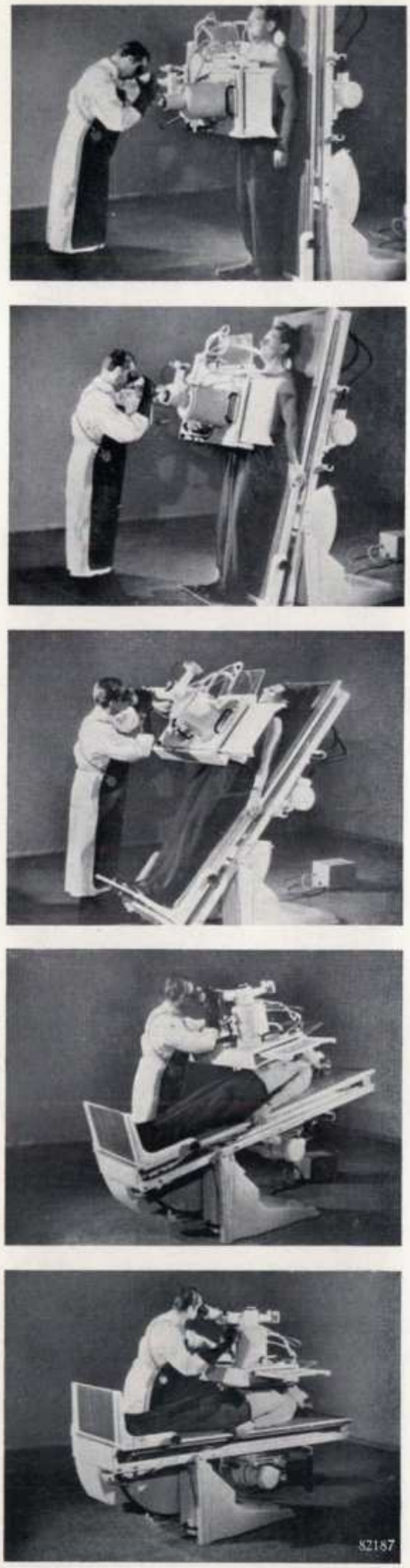


Fig. 3. Het gebruik van de periscopische waarnemingsoptiek bij verschillende standen van de patient, die bij sommige doorlichtingstechnieken worden toegepast.

regelen als hij het gemakkelijkst vindt. De andere hand blijft dan nog beschikbaar voor verder gebruik bij het onderzoek (*fig. 3*).

Deze draaiing van het gedeelte *S-L* om de as *X-X'* maakt het omkeerprisma *Z* noodzakelijk. Zonder dit prisma zou nl. bij die draaiing het beeld in het gezichtsveld eveneens draaien en derhalve scheef of zelfs ondersteboven komen te staan. Een snelle identificatie van het waargenomen beeld zou hiermede belemmerd kunnen worden.

Ter toelichting van de werking van dit omkeerprisma moge het volgende dienen.

Het is bekend dat het beeld hetwelk men met behulp van één vlakke spiegel verkrijgt, natuurgetrouw is behalve dat links en rechts verwisseld zijn. Men ziet het zg. spiegelbeeld, een geschreven tekst is daarin onleesbaar. Boven en onder zijn niet verwisseld, we zien onszelf in een vlakke spiegel niet op het hoofd staan.

Heeft men twee vlakke spiegels waarvan de vlakken evenwijdig staan, dan worden door de spiegeling in de tweede spiegel nog eens links en rechts verwisseld, zodat het eindbeeld weer leesbaar schrift oplevert. Aan de boven- en onderstand wordt door de tweede spiegel evenmin iets veranderd (*fig. 4*).

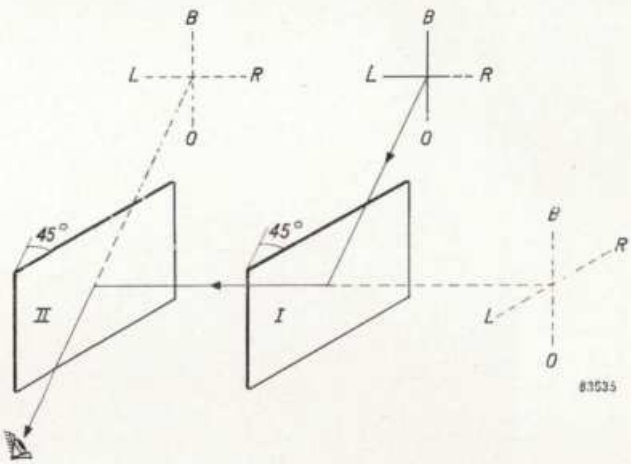


Fig. 4. De spiegeling in spiegel *I* geeft een virtueel beeld in spiegelschrift. Door de spiegeling in *II* wordt dit weer tot leesbaar schrift teruggebracht.

Gaat men echter de tweede spiegel draaien om de as *X-X'*, zoals dat bij de periscoop het geval is, dan treden er onaangename verschijnselen op. Denken we ons de tweede spiegel over 90° gedraaid (*fig. 5*). Het beeld van de eerste spiegel, waarin *L* en *R* verwisseld zijn, wordt nu niet meer door de tweede spiegel in zijn oude toestand teruggebracht, maar integendeel, de werking van de tweede spiegel heeft thans invloed op de richting boven-onder (*B-O*) van het eerste beeld; het resultaat is een beeld waarin zowel links-rechts als boven en onder verwisseld zijn. Het beeld is dus weer leesbaar, alleen is het in het gezichtsveld om de waarnemingsrichting over een hoek van 90° gedraaid, tenminste als de waarnemer met de rug naar ons toe staat en bij de draaiing van de tweede spiegel alleen het hoofd voorover buigt om het beeld te blijven zien, en niet het lichaam verplaatst. De kijkrichting is dus in fig. 5 ook 90° gedraaid.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Om deze draaiing van het beeld in het gezichtsveld te compenseren, wordt nu gebruik gemaakt van een prismasysteem Z met drie spiegelende vlakken (*fig. 6*) [2]). Door het oneven aantal spiegelingen levert dit systeem (evenals één enkele spiegel) een spiegelverkeerd beeld. Draait men het

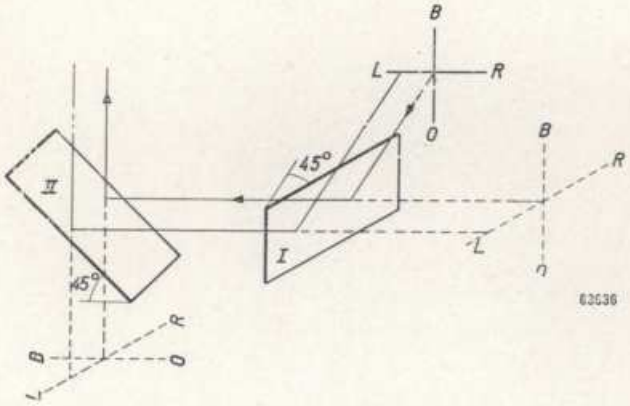


Fig. 5. Voor een waarnemer die met de rug naar ons toe gekeerd omlaag in spiegel *II* kijkt, is het voorwerp *LBRO* schijnbaar in het gezichtsveld over een hoek van 90° linksom gedraaid.

prisma 90° om de richting van de lichtstralen, dan is het gehele beeld in het gezichtsveld over 180° gedraaid. Het waargenomen beeld draait dus met de dubbele hoeksnelheid van de draaiing van het prisma [3]). Om de bovengenoemde beelddraaiing bij de periscopische waarnemingsoptiek te compenseren, moet men dus het prisma met de halve hoeksnelheid van de kijkrichting *E-B* bewegen.

Ten slotte nog het volgende. Het beeld op het kijkscherm van de beeldversterkerbuis staat omgekeerd. Doordat in fig. 2 het objectief *O* ook beeldomkeer geeft, staat *B* rechtop. Twee evenwijdige spiegels (*S* en *P*) geven geen verandering en de beelddraaiing wordt door de prismadraaiing gecompenseerd. Maar zojuist is uiteengezet dat de drie spiegelingen van het prisma *Z* niet alleen een draaiing maar ook een verwisseling geven. Om dit weer goed te maken, is voor *P* niet een eenvoudige spiegel of prisma gebruikt maar een zg. dakkantprisma (*fig. 7*). De spiegeling gebeurt hierbij niet aan een plat vlak (waar alleen *L* en *R* verwisseld worden), maar aan twee onderling loodrechte vlakken, een soort trog, waarin nu ook nog *B* en *O* verwisseld zijn. Een dergelijk prisma levert een omgekeerd,

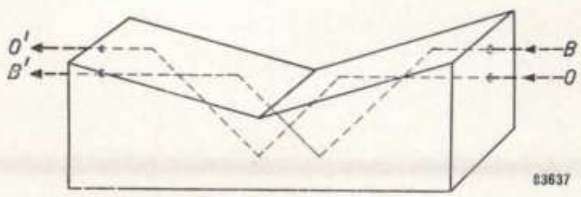


Fig. 6. Prisma volgens J. T. Taylor (Brit. J. Phot. **14**, 348, 1867) met drie spiegelingen. Boven en onder zijn verwisseld. Bij draaiing van het prisma met hoeksnelheid ω om de richting OB' draait het beeld in het gezichtsveld met de halve hoeksnelheid, dus met $^1/_2\,\omega$.

[2]) Zie bijv. Czapski-Eppenstein, Grundzüge der Lehre der Theorie der optischen Instrumente, Barth, Leipzig 1924, 3e druk, blz. 593-599.

[3]) Men krijgt een zelfde effect als bij draaiing van één enkel vlak spiegeltje waarin men scherend over het oppervlak kijkt.

leesbaar beeld, zoals fig. 7 nader toelicht. In principe hadden we de dakkantspiegel ook op de plaats van *S* kunnen invoeren; we hebben de voorkeur gegeven aan plaats *P*, omdat dan ook het gefotografeerde beeld normaal leesbaar wordt (zie hieronder).

De aandachtige lezer zal nu kunnen verifiëren dat in fig. 2 het prisma *Z* vanwege de overzichtelijkheid in een 90° gedraaide stand is getekend!

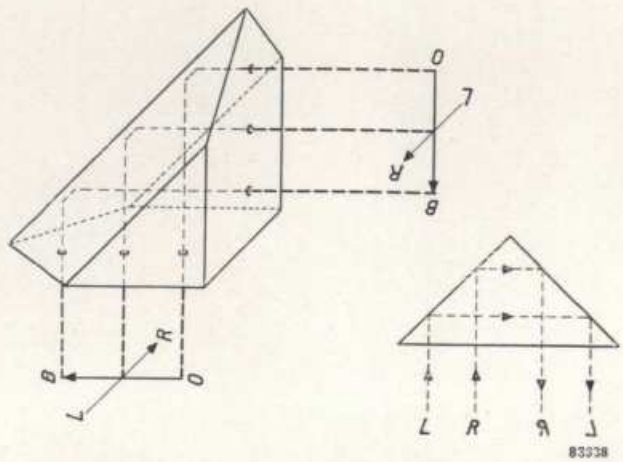


Fig. 7. Dakkantprisma. Het 45°-prisma geeft een beeldomkeer voor de richting *B-O*, terwijl in de figuur rechts onder wordt duidelijk gemaakt dat een dakkantspiegel (twee spiegelende vlakken welke onderling een hoek van 90° maken) een beeld vormt waarin *L* en *R* zijn verwisseld.

Beschrijving van de constructie

De beschouwing van de werking van het omkeerprisma *Z* toont aan dat bij draaiing van de inkijkopening *E* om de periscoopas *X-X'* het prisma *Z* met de halve hoeksnelheid van *E* en *S* meegedraaid moet worden. De kijkinrichting bestaat derhalve uit drie stukken (*fig. 8*):

1) een vast aan de beeldversterkerbuis verbonden deel *1*, waarin het objectief *O* en het dakkantprisma *P* gemonteerd zijn;
2) een aan deel *1* aansluitend gedeelte *2*, dat draaibaar is om de as *X-X'* en waarin zich de loupe *L* en de spiegel *S* bevinden;
3) een met deel *2* om dezelfde as *X-X'* doch met de halve hoeksnelheid draaiend deel *3*, waarin zich het omkeerprisma *Z* bevindt.

De noodzakelijke koppeling tussen deel *2* en *3* wordt verkregen door middel van een planetentandradaandrijving *4*. Deze bestaat uit twee tandkransen *5* en *6* (aan gedeelte *1* resp. *2*) en de twee conische tandraderen *7*, welker assen door gedeelte *3* gedragen worden.

Aan de dimensionering van het prisma *Z* zitten enkele problemen vast, waarvan de bespreking hier echter te ver zou voeren [4]).

[4]) H. Jensen, Die Abmessungen von Abbe-Umkehr- und Aufrichteprismen, Optik **12**, 1955, in druk.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Om storend zijlicht tegen te houden en om gemakkelijk te kunnen kijken, is een soepele voorhoofdsteun *8* aangebracht. Deze kan op de slede *10* en *11* verschuiven, zodat men naar wens met het linker- of het rechteroog kan waarnemen. Bovendien kan het gedeelte *9* draaien om de richting *E-E'*, zodat men het hoofd ook naar believen scheef kan houden.

Voor wie het bezwaarlijk is om het ongebruikte oog dicht te knijpen of in het donker te laten staren, zijn op voorstel van Prof. Dr. H. Schober links en rechts van de inkijkopening *E* kleine openingen *12* aangebracht. Deze kunnen dan door middel van een lampje *13* en een groen filter *14* het ongebruikte oog een lichtzwak veld van dezelfde kleur als het beeldversterkerbeeld bieden.

Het fotografisch vasthouden van het beeld kan op zeer eenvoudige wijze geschieden. In fig. 1 ziet men loodrecht op de periscoopas een tweede buis met een kleinbeeldcamera; in fig. 2 is deze naar rechts getekend. Op het gewenste opnamemoment wordt het prisma *P* met behulp van de knop *K* in de richting van de camera *C* gedraaid en het licht van de beeldversterkerbuis wordt door het objectief *O* en een extra lens *D* op de film in de camera geworpen. Doordat *P* een dakkantprisma is, verkrijgt men op de film geen spiegelverkeerd beeld.

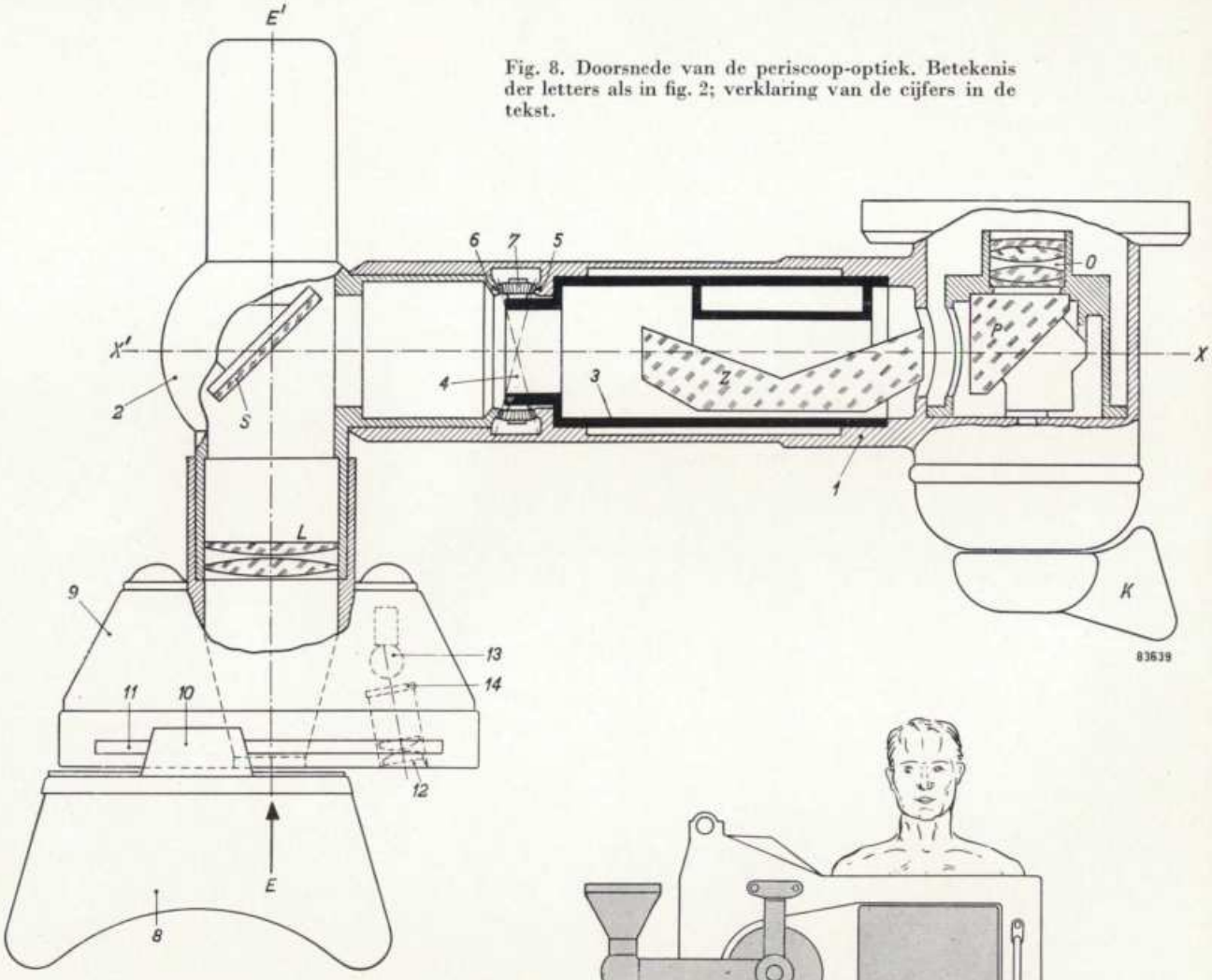


Fig. 8. Doorsnede van de periscoop-optiek. Betekenis der letters als in fig. 2; verklaring van de cijfers in de tekst.

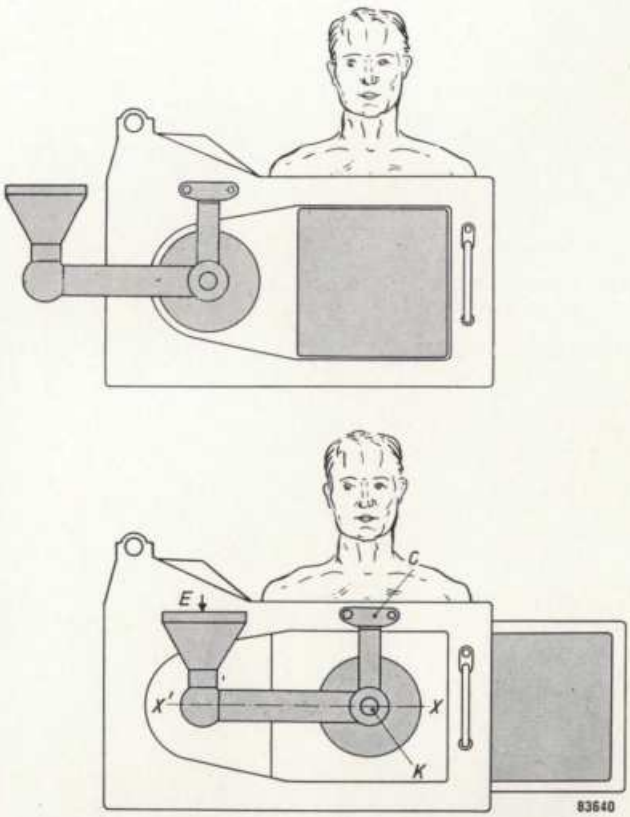


Fig. 9. De bovenste figuur geeft de toestand bij gebruik van het normale doorlichtingsscherm weer, in de onderste figuur is de beeldversterker voor de patient geschoven. Betekenis der letters als in fig. 2 en 8.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het transporteren van de film en het openen van de sluiter worden door de knop *K* bewerkstelligd, tegelijk sluit deze knop een electrisch contact, waardoor de röntgeninstallatie automatisch van doorlichtings- op opname-intensiteit en -spanning overgeschakeld wordt; de electronische tijdschakelaar in het röntgenapparaat zorgt voor de gewenste belichting. In de camera wordt 35 mm-film met een beeldformaat van 24 × 24 mm gebruikt. De camera is met een veerwerk voor het automatisch transport van 55 opnamen uitgerust.

Doordat de beeldversterkerinrichting in een slede is aangebracht, kan het geheel terzijde geschoven worden en een normaal doorlichtingsscherm in de röntgenstralenbundel gebracht worden (*fig. 9*). Daarbij zijn ook gerichte foto's mogelijk met normale filmcassetten van groot formaat, zoals bij iedere andere röntgendiagnostiekinstallatie. Aldus heeft de behandelende arts te allen tijde de beschikking over de hulpmiddelen van de bestaande techniek zowel als over die van de beeldversterkertechniek en kan hij de ervaringen van de een en de ander vergelijken.

V. MEDISCHE BESCHOUWINGEN BETREFFENDE DE BEELDVERSTERKER

door J. FEDDEMA *). 621.386.8:616-073.75:621.383.8

Zowel bij de doorlichting als bij de röntgenfotografie, die als de grondpijlers der huidige röntgendiagnostiek zijn te beschouwen, zal de beeldversterker een belangrijke rol gaan spelen. Wij willen deze gebieden in het navolgende afzonderlijk bespreken.

Doorlichting

Bij ieder röntgenonderzoek wordt de patient blootgesteld aan een voor hem min of meer schadelijke straling — een feit dat gelukkig steeds meer de aandacht krijgt van de medici die röntgenstralen voor het diagnostisch onderzoek gebruiken. Kwantitatief speelt in dit opzicht meestentijds de doorlichting (lange expositieduur bij geringe stralenintensiteit) een veel grotere rol dan de fotografie (zeer korte expositieduur bij grote intensiteit). Om de dosis bij de doorlichting zoveel mogelijk te kunnen beperken, laat de onderzoeker eerst, normaliter gedurende minstens 15 minuten, zijn ogen aan een zeer laag helderheidsniveau wennen, en om onnodig tijdverlies voor readaptatie der ogen te voorkomen, worden tegenwoordig alle gevallen waarbij doorlichting noodzakelijk is, steeds zoveel mogelijk in serie afgewerkt.

Bij een normale longdoorlichting is, na een dergelijke adaptatie, een stroomsterkte in de röntgenbuis van $2^1/_2$-5 mA bij een spanning van 60-70 kV gebruikelijk, om voldoende zeker te zijn van een juiste beoordeling der longstructuur. Met de beeldversterker komt men bij dezelfde spanning en zonder voorafgaande adaptatie tot hetzelfde resultaat met een stroomsterkte die een waarde van 0,5 mA niet behoeft te overschrijden. De dosis wordt dus met een factor 10 gereduceerd. Hoewel voor dikkere en meer massieve objecten (bijv. laterale doorlichting der buikorganen) deze winst relatief afneemt, is zij ook hier zeker nog aanwezig; bij deze dikkere objecten is een effectief strooistralenrooster noodzakelijk gebleken.

Met het door Burger ontworpen fantoom van „Philite" materiaal [1]) werden metingen gedaan voor een objectdikte overeenkomende met een menselijke thorax. Hierbij bleek dat bij gelijke buisspanning de beeldversterkerdoorlichting met 0,1 mA ongeveer dezelfde contrast-detail-waarneembaarheid (zie II) geeft als normaal doorlichten met 4 mA. Bij beeldversterkerdoorlichting met 3 mA verschuift deze contrast-detail-waarneembaarheid reeds vrij ver in de richting van een normale röntgenfoto van groot formaat. Deze laatste kan echter ook met de beeldversterkerdoorlichting nooit geëvenaard worden, aangezien de bij de doorlichting beschikbare aantallen röntgenquanta gedurende de accumulatietijd van het oog (0,1-0,2 sec) beduidend kleiner zijn dan die welke voor de röntgenfoto gebruikt worden (zie II). Daarbij komt nog het effect dat door de grote gamma van de emulsie de contrasten op de foto met een factor $2^1/_2$ à 3 zijn vergroot. Bij doorlichting met de beeldversterker blijven de contrasten op zichzelf gelijk aan die bij normaal doorlichten, alleen zijn deze contrasten op een veel hoger helderheidsniveau gebracht. Dit verklaart ook waarom doorlichting met de beeldversterker aanvankelijk voor de waarnemer vaak een teleurstelling is; immers, hij verwacht, door het feit dat het doorlichtingsbeeld met de beeldversterker wordt

*) Medische Afdeling der N.V. Philips, Eindhoven.

[1]) Philips techn. T. **11**, 295-302, 1949.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

waargenomen bij nagenoeg dezelfde helderheid waarbij normaliter röntgenfoto's voor een lichtkast worden beoordeeld, een dienovereenkomstige (contrastrijke) indruk.

Fotografie

De beperkende factor voor de beeldkwaliteit bij de fotografie met de beeldversterker is, behalve de onscherpte van het röntgen- en het kijkscherm, de korrel van de gebruikte film. Doordat het te fotograferen kijkscherm een grote helderheid heeft, kan men voor enkelvoudige opnamen ongevoelige, fijnkorrelige films gebruiken. Het is gebleken dat bij gebruik van Kodak „Micro-File" film de benodigde röntgenintensiteit bij een openingsverhouding van de optiek 1 : 1,5 slechts de helft tot een kwart bedroeg van de waarde voor een normale röntgenfoto op groot formaat van hetzelfde object bij dezelfde buisspanning. Een dergelijke 35 mm-foto geeft dank zij het grote contrast en de zeer kleine filmkorrel bijna dezelfde informatie als een normale röntgenfoto.

Vergelijken we de beeldversterkerfotografie met de gewone schermfotografie (röntgencamerafotografie [2]), dan hebben wij bij de beeldversterker een nadeel, nl. het kleine gezichtsveld. Aan de andere kant staan enkele niet te onderschatten voordelen, te weten: een kleinere, gemakkelijk hanteerbare apparatuur; gemakkelijke instelling van de opname met behulp van doorlichten zonder voorafgaande adaptatie; de mogelijkheid tot het maken van enkelvoudige opnamen op 35 mm-film met fijne korrel en steile gradatie en daardoor uitstekende beeldkwaliteit; en dit bij een röntgendosis die minstens 3 × kleiner is dan de waarden in de normale röntgenfotografie, in plaats van 3 à 4 × groter, zoals bij de röntgencamerafotografie het geval is.

Cinematografie

Een grote toekomst zal, naar het zich laat aanzien, de cinematografie met behulp van de beeldversterker beschoren zijn. Het is de enige voor de patient (overdosering) en voor de röntgenbuis (overbelasting) ongevaarlijke methode om snel verlopende processen in het menselijk lichaam fotografisch vast te leggen.

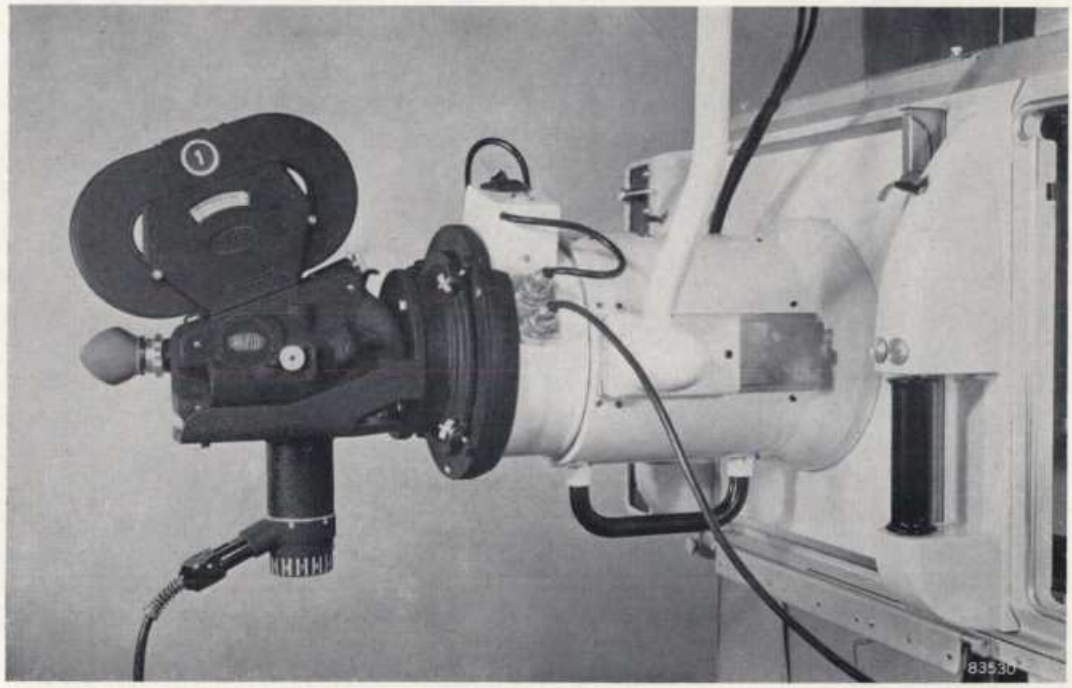


Fig. 1. Apparatuur voor cinematografie met de beeldversterker. Rechts de waarnemingsinrichting op het statief van een normale röntgendiagnostiekinstallatie. In plaats van het doorlichtingsscherm is hierop de beeldversterker gemonteerd. Links de filmcamera, met er bovenop het filmmagazijn en in de verlengde hartlijn van de beeldversterker een kijkertje voor controle van het beeld tijdens het filmen (zie III).

Hierbij wordt gebruik gemaakt van een gevoeliger 35 mm-film, bijv. Gevaert „Orthoscopix" of Agfa „Fluorapid". De dosis voor een enkelvoudige opname bij gebruik van een dergelijke film blijkt minder dan 1/10 van de waarde voor een normale röntgenopname te bedragen, hetgeen dus direct impliceert de mogelijkheid tot cinematografie. Talrijke filmopnamen werden reeds met behulp van de beeld-

[2]) Zie bijv. Philips techn. T. **13**, 281-293, 1951; **16**, 51-57, 1954.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

versterker verwezenlijkt. Een apparatuur voor cinematografie met de beeldversterker is in *fig. 1* afgebeeld. Enkele gegevens vindt men in *tabel I* [3]).

Tabel I. Voorbeelden van reeds gemaakte filmopnamen met de beeldversterker.

1) Slikbewegingen ter hoogte van de larynx (het strottehoofd) in laterale projectie. 80 kV, 10 mA, 20 beeldjes/sec, duur 15 sec.
   6 m film bij een totale dosis van circa 2 r.
2) Opname in frontale projectie van de bulbus (begin van de twaalfvingerige darm). 120 kV, 11 mA, 8 beeldjes/sec, duur 2 minuten.
   20 m film, bij een totale dosis van 50 r.
3) Blaaslediging. 125 kV, 20 mA, 8 beeldjes/sec, duur 56 sec.
   10 m film, bij een totale dosis van 45 r.
4) Cerebrale angiografie (bloedvaatonderzoek in de hersenen) in laterale projectie. 90 kV, 10 mA, 16 beeldjes/sec, duur 20 sec.
   7 m film, bij een totale dosis van minder dan 5 r.

Bijna al deze filmopnamen konden worden gemaakt met een röntgenbuis met 0,3 mm focus, zonder de buis te zwaar te belasten. De afstand van focus tot scherm bedroeg steeds 90 cm, omdat gebruik werd gemaakt van een voor deze afstand geconstrueerd strooistralenrooster.

Blijkt reeds uit bovenstaande voorbeelden dat het dosisprobleem bij deze röntgencinematografie met de beeldversterker min of meer op de achtergrond is geraakt, nog duidelijker wordt dit aangetoond door *tabel II*, die een indruk geeft omtrent de dosis voor de patient bij verschillende technieken in de maagröntgenografie.

Tabel II. Dosisvergelijking bij röntgenografie van de maag (objectdikte 21 cm) volgens verschillende methodes. Alle opnamen werden gemaakt met een zesventielapparaat, 120 kV, 1 mm Al-filter, normaal strooistralenraster, focus-schermafstand 100 cm.

Methode	Dosis in r
Normale röntgenfoto.	0,5
Röntgencamerafotografie met spiegelcamera	
a) Enkelvoudige opnamen	
Gevaert „Ortho Scopix"	2,5
Zelfde film met 2× vergrote schaduwprojectie	10
b) Serie-opnamen op 70 mm-formaat	
5 beeldjes per sec gedurende 1 sec	12,5
5 beeldjes per sec gedurende 10 sec	125
c) Cinematografie op 35 mm-film	
20 beeldjes per sec gedurende 1 sec	35
20 beeldjes per sec gedurende 1 min	2000
Beeldversterkerfotografie met tandem-lenssysteem	
a) Enkelvoudige opnamen	
Gevaert „Ortho Scopix"	0,05
Kodak „Micro-File"	0,75
b) Cinematografie op 35 mm-film Gevaert „Ortho Scopix" of Agfa „Fluorapid" met 8 beeldjes/sec gedurende 2 min; totale lengte van de film 20 m, totaal aantal beeldjes op de film 1000.	
Totale dosis	50

Diagnostische onderzoekmethodes

Ten einde nog een indruk te geven omtrent de mogelijke toepassing van de beeldversterker bij verschillende in de röntgendiagnostiek gebruikelijke onderzoekmethodes, volgt hier een globaal overzicht.

Onderzoek van skelet en gewrichten der ledematen

Aangezien bij skeletonderzoek meestal kleine veranderingen in de beenstructuur van primair belang zijn, zal hiervoor de normale röntgenfoto wel onontbeerlijk blijven. In dit gebied kan de beeldversterker dus de normale röntgenfoto niet vervangen, maar voor orienterende doorlichting vóór de eigenlijke röntgenfoto is hij zeer waardevol. Men is dan zeker van een goede projectierichting (bijv. het vrijprojecteren van gewrichtsspleten en kleine verkalkingen). Ook bij het localiseren van splinters, granaatscherven e.d. en voor controle na het vullen van een gewricht met contrastvloeistof of lucht, is beeldversterkerdoorlichting geschikt.

Verder is de beeldversterker het ideale apparaat om na te gaan of de repositie van beenbreuken, ontwrichtingen e.d. aan de verwachtingen beantwoordt. Speciaal bij deze verrichtingen werd vaak het stralengevaar sterk onderschat en menig arts heeft hierbij reeds een beschadiging aan vingers of handen opgelopen. Hetzelfde geldt voor het zg. pennen van fracturen, waarbij door de schacht van het gebroken bot een roestvrije metalen pen wordt ingebracht. In de operatiekamer kan nu ter plaatse worden nagegaan of de ligging van een ingebrachte pen aan de verwachtingen beantwoordt, waarbij dus het vaak enerverende wachten op het ontwikkelen van röntgenfoto's, zoals vroeger het geval was, tot het verleden behoort en de duur der operatie wordt verkort.

Onderzoek van de wervelkolom

Ofschoon met de beeldversterker, speciaal in het gebied der halswervels, reeds een vrij goede indruk kan worden verkregen omtrent eventueel aanwezige afwijkingen in de wervelkolom, zal toch, voor een juiste beoordeling van de botstructuur, de normale

[3]) Deze experimenten werden gedaan in samenwerking met J. van der Wal en J. Proper van het Natuurkundig Laboratorium te Eindhoven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

röntgenfoto ook hier voorlopig zijn aangewezen. Wel zal bij de zg. myelografie, waarbij een weinig contrastmiddel in het ruggemergskanaal gebracht wordt en men door liggingsveranderingen van de patient nagaat, waar de passage van een dergelijk contrastmiddel belemmerd is, de beeldversterker kunnen toepassen. Van groot belang is hier niet alleen het werken bij daglicht maar ook de geringe dosis voor de patient, aangezien de meeste afwijkingen hierbij worden gevonden in het lendengebied, alwaar de nabijheid der voor stralen zeer gevoelige geslachtsorganen tot extra voorzichtigheid noopt.

Onderzoek van de schedel

In de spreekkamer van de oor-, neus- en keelarts kan een eenvoudige apparatuur dienstig zijn om bijv. een ontsteking der neusbijholten, hetzij door slijmvlieszwelling, hetzij door vochtophoping in een dergelijke holte, te onderzoeken. Het tegenwoordige gezichtsveld van de beeldversterker, van $13^1/_2$ cm, is ruim voldoende om met één oogopslag hieromtrent een indruk te verkrijgen (*fig. 2*). Verder kan ook de röntgencinematografie van het kaakgewricht van waarde blijken te zijn voor de kaakchirurg.

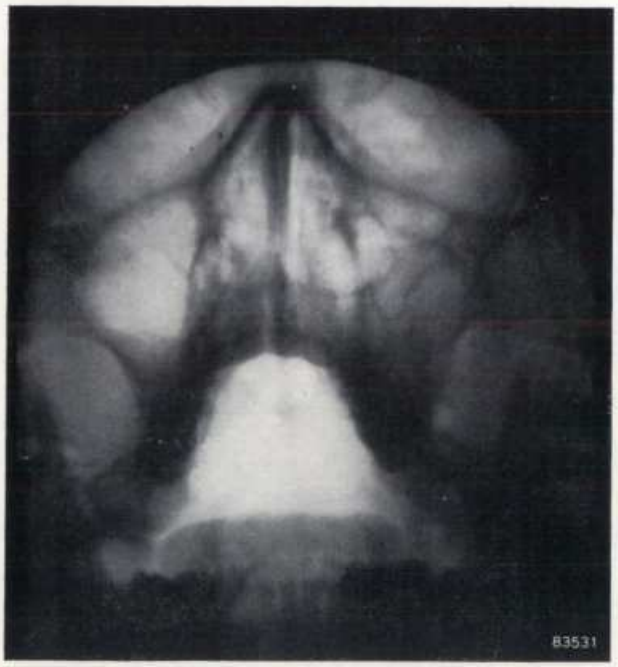


Fig. 2. Reproductie van een enkelvoudige opname met de beeldversterker. De opname toont de sinusholten (neusbijholten in de bovenkaak).

Ook in de schedelangiografie, waarbij men door inspuiting van een contrastmiddel in de halsslagader de doorgang door de bloedvaten in de hersenen bestudeert, zal cinematografie gebruikt worden.

Onderzoek van de spijsverteringsorganen

Aangezien de voedselpassage in het bovenste gedeelte van de slokdarm zeer snel verloopt, is reeds sinds lange tijd de wens geuit de bewegingen van het strottehoofd e.d. cinematografisch te registreren.

In Zweden werd dit reeds in 1946 door Holmgren gedaan met behulp van schermcinematografie. Cinematografie met de beeldversterker biedt hier betere mogelijkheden door gebruik van een groter aantal beeldjes per seconde (*fig. 3*). De passage is in het onderste deel van de slokdarm en in de maag en dunne darm veel langzamer, cinematografie hiervan is derhalve niet een eerste vereiste, maar wel kan beeldversterkerdoorlichting nuttig zijn. Spectaculair is een film van de bewegingen van maag en darm zeker wel en voor instructie in hoge mate geschikt.

Onderzoek van nieren en geslachtsorganen

Het is zeer goed mogelijk met behulp van de beeldversterkerdoorlichting een duidelijke indruk te krijgen omtrent de met contrastmiddel gevulde nierkelken en hun contracties. Bij de retrograde pyelografie, waarbij het contrastmiddel via de urinewegen ingebracht wordt, is dit zeer fraai te volgen.

Bij de cystografie worden meestal gedurende de lediging momentopnamen van de blaas gemaakt, dus normale enkele foto's. Bij deze methode kan in de toekomst gebruik worden gemaakt van de beeldversterkercinematografie. Door de nabijheid der genitalia is men genoodzaakt de dosis bij dit onderzoek bijzonder laag te houden, evenals bij de hysterosalpingografie, waarbij een contrastmiddel ingebracht wordt in de baarmoeder, meestal om na te gaan of de eileiders doorgankelijk zijn. Steeds kunnen het inbrengen en de manipulatie met de instrumenten bij daglicht bekeken worden.

Het röntgenonderzoek bij zwangerschap dient tot het uiterste te worden beperkt; alleen in de laatste weken is het soms noodzakelijk, om een indruk te krijgen omtrent de ligging van het kind, afwijkingen aan het bekken enz. Hierbij blijft de normale röntgenfoto de beste methode.

Onderzoek van longen en luchtwegen

Bij serie-longdoorlichtingen speelt de tijd nodig voor adaptatie vrijwel geen rol en toepassing van de beeldversterker hierbij zal, gezien het kleine beeldveld, voorlopig wel achterwege blijven. Wel is het denkbaar dat men de beeldversterker zal gebruiken voor orienterend onderzoek van een enkele patient, terwijl het gebruik ook bij plaatselijke afwijkingen, met het oog op de grote contrast-detail-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

waarneembaarheid, wel degelijk overweging verdient. Localisatie van schaduwgevende vreemde voorwerpen in de luchtwegen kan zeer goed geschieden, en speciaal bij het verwijderen ervan is controle met beeldversterkerdoorlichting omtrent de ligging van ingebrachte instrumenten ten opzichte van dergelijke vreemde lichamen ideaal.

komt in aanmerking voor het onderzoek van sterk gelocaliseerde afwijkingen van het hart en de aangrenzende bloedvaten.

Voor een algemeen hartonderzoek bij volwassenen is een groter beeldveld noodzakelijk, bij kinderen echter werden reeds opmerkelijke resultaten verkregen betreffende de hartfunctie.

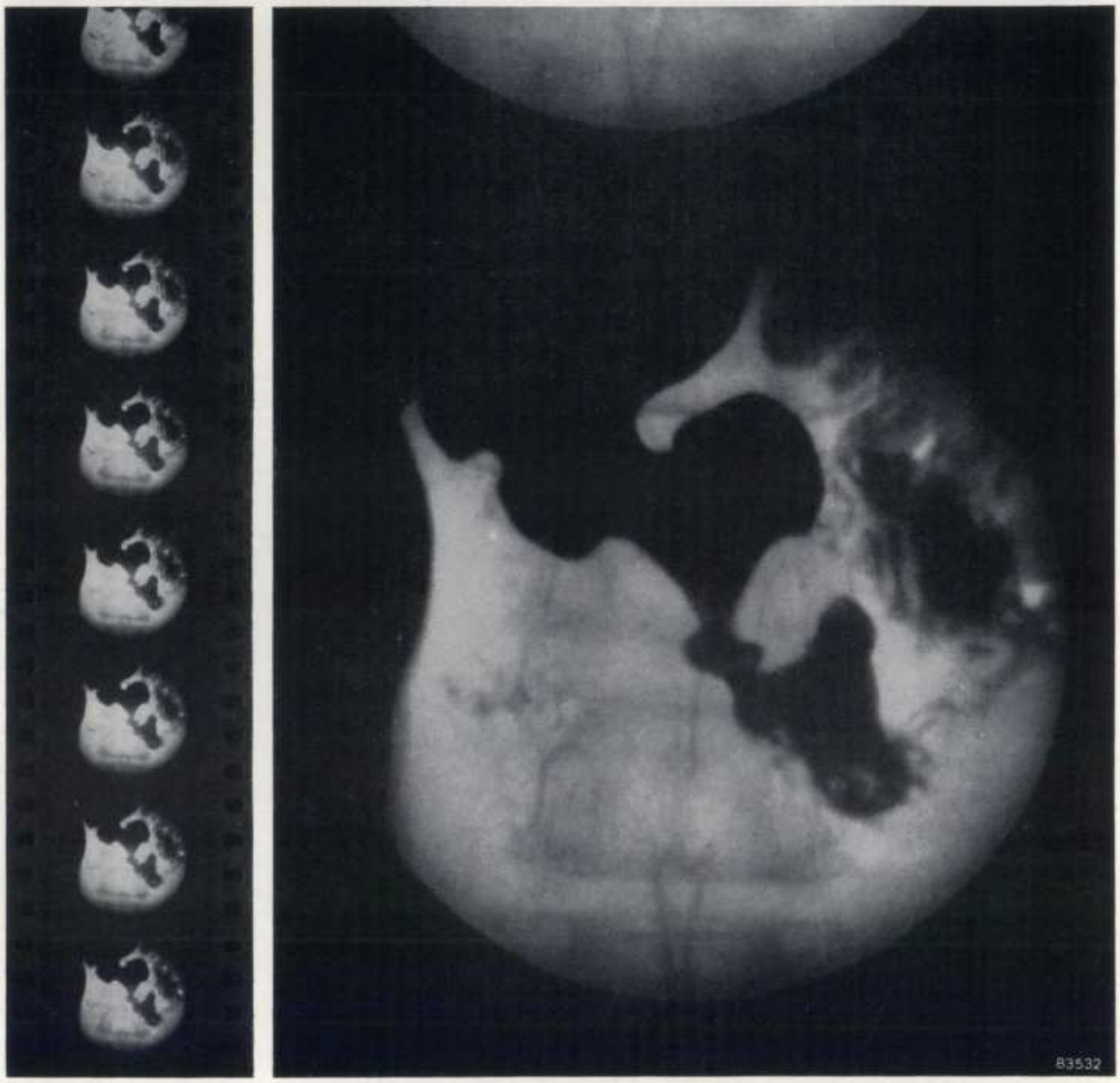


Fig. 3. Cinematografie van de maag. Links reproductie van een deel van de filmstrook, rechts vergroting van een beeld hieruit.

Onderzoek van het hart

Bij de hartcatheterisatie kan door gebruik van de beeldversterker bij het inbrengen van de catheter, hetgeen soms zeer lang duurt, de röntgendosis aanzienlijk verminderd worden. De cinematografie

Deze opsomming zou nog aanzienlijk uitgebreid kunnen worden. De vermelde voorbeelden zullen echter wel voldoende hebben geïllustreerd welke belangrijke plaats de röntgenbeeldversterker in de medische diagnostiek zal kunnen innemen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

VI. MATERIAALONDERZOEK MET DE BEELDVERSTERKER

door G. LANG *) en R. O. SCHUMACHER *). 620.179.1:621.386.8:621.303.8

Het materiaalonderzoek met röntgenstralen heeft in de industrie uitgebreide toepassing gevonden en is heden onder de niet-destructieve keuringsmethodes een der belangrijkste en betrouwbaarste. Zo worden bijv. in de industrie der lichte metalen op grote schaal gietstukken met röntgenstralen op fouten onderzocht. Men werkt daarbij eenvoudig met doorlichting. Dank zij de betrekkelijk geringe absorptie door de legeringen van lichte metalen, is de helderheid van de röntgenschaduwbeelden voldoende. De detailwaarneembaarheid is bij gebruik van een röntgenbuis met klein focus (afmetingen 0,4 × 0,4 mm), die het werken met vergrote schaduwbeeldprojectie mogelijk maakt [1]), buitengewoon goed.

Minder gunstig is de situatie op het gebied van het onderzoek van staal. Om voor zwaar belaste onderdelen, bij de bouw van ketels, tanks, bruggen, schepen, enz., gelaste constructies te kunnen toepassen, is men vrijwel steeds aangewezen op een betrouwbaar niet-destructief onderzoek dat een inzicht in de kwaliteit van de lassen levert. Ten gevolge van de sterke absorptie door het ijzer komt echter in het algemeen een röntgendoorlichting van stalen constructie-elementen niet in aanmerking. De röntgenschaduwbeelden zijn zeer lichtzwak, zodat een doorlichting alleen in verduisterde lokalen met goed aan het donker geadapteerde ogen uitvoerbaar is. In vele gevallen, waar de te onderzoeken constructie-elementen te zwaar of te groot zijn om ze in een onderzoeklokaal te kunnen brengen, vervalt de mogelijkheid van doorlichting daardoor al ten enen male. Bovendien is de detailwaarneembaarheid bij de doorlichting van staal beperkt; om niet al te kleine helderheden op het scherm te verkrijgen, moet men dikke, grofkorrelige doorlichtingsschermen gebruiken en met een röntgenbuis van groot vermogen werken, waarbij het focus niet zeer klein kan zijn. Derhalve is het onderzoek van staal met het doorlichtingsscherm in de practijk slechts mogelijk voor wanddikten tot 6 of 8 mm. Aangezien bij de meeste gelaste constructies het te doorstralen materiaal dikker dan 8 mm is, was het röntgenonderzoek van zulke constructies tot dusverre alleen mogelijk langs de fotografische weg, die echter betrekkelijk duur en tijdrovend is.

Het ligt voor de hand, dat de grote helderheidswinst die met de röntgenbeeldversterker wordt verkregen, de genoemde nadelen van de doorlichtingsmethode bij het onderzoek van staal aanzienlijk zal verminderen of geheel zal opheffen. De hieruit voortvloeiende nieuwe toepassingsmogelijkheden voor het röntgenonderzoek in industriële productieprocessen zijn in het applicatielaboratorium van C. H. F. Müller in Hamburg nagegaan. Hier volgt

Fig. 1. Doorlichtingstoestel met röntgenbeeldversterker voor proeven en demonstraties.
Achter het ruitje van loodglas ziet men de stralenuittreeopening van de verticaal naar boven stralende röntgenbuis. Hierboven ziet men het te onderzoeken werkstuk, in dit geval een gelaste vertakking van een pijp. De beeldversterker, die in de doos boven op het toestel is gemonteerd, is voorzien van een periscoop-optiek. Met de beide links op het toestel zichtbare handvatten, waarmede de waarnemer juist bezig is te manipuleren, kan men het werkstuk verschuiven en draaien.

*) C. H. F. Müller Aktiengesellschaft, Hamburg.

[1]) Zie bijv. G. C. E. Burger, B. Combée en J. H. van der Tuuk, Röntgendoorlichting met vergroot beeld, Philips techn. T. **8**, 321-329, 1946.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

een korte samenvatting van de resultaten [2]).

De proefopstellingen die voor de uitvoering van het onderzoek werden gebruikt, zijn in *fig. 1* en *2* weergegeven. Bij de eerste opstelling werd gebruik gemaakt van de periscoop-optiek zoals die in artikel IV van deze serie is beschreven, in de tweede opstelling werd de binoculaire microscoop gebruikt (zie artikel III). Voor het materiaalonderzoek lijkt ons een binoculaire optiek beter geschikt, aangezien bij lange werktijden een waarneming met twee ogen minder vermoeit. Bij de doorlichting ontdekte fouten kunnen voor nauwkeuriger controle of voor de documentatie bij een keuring worden gefotografeerd, hetzij rechtstreeks vanaf het kijkscherm van de beeldversterkerbuis met behulp van een aan de waarnemingsoptiek gemonteerde kleinbeeldcamera, hetzij op de gebruikelijke wijze op film of röntgenpapier dat in een cassette ter belichting vóór de beeldversterker wordt geplaatst.

De proeven werden gedaan met platen en buizen van staal van verschillende dikte. Een maatstaf voor de bereikte detailwaarneembaarheid werd verkregen door middel van de voor röntgenfoto's gebruikelijke DIN-testobjecten; zulk een testobject, dat aan de kant van de röntgenbuis op het te onderzoeken object wordt bevestigd, bevat een reeks draden van afnemende dikte uit hetzelfde materiaal als het te onderzoeken werkstuk. Heeft de dunste draad die de waarnemer nog kan onderscheiden, een diameter van bijv. 3% van de doorstraalde dikte, dan spreekt men van een draadwaarneembaarheid van 3% en beschouwt dit als een indicatie voor de beeldkwaliteit [3]).

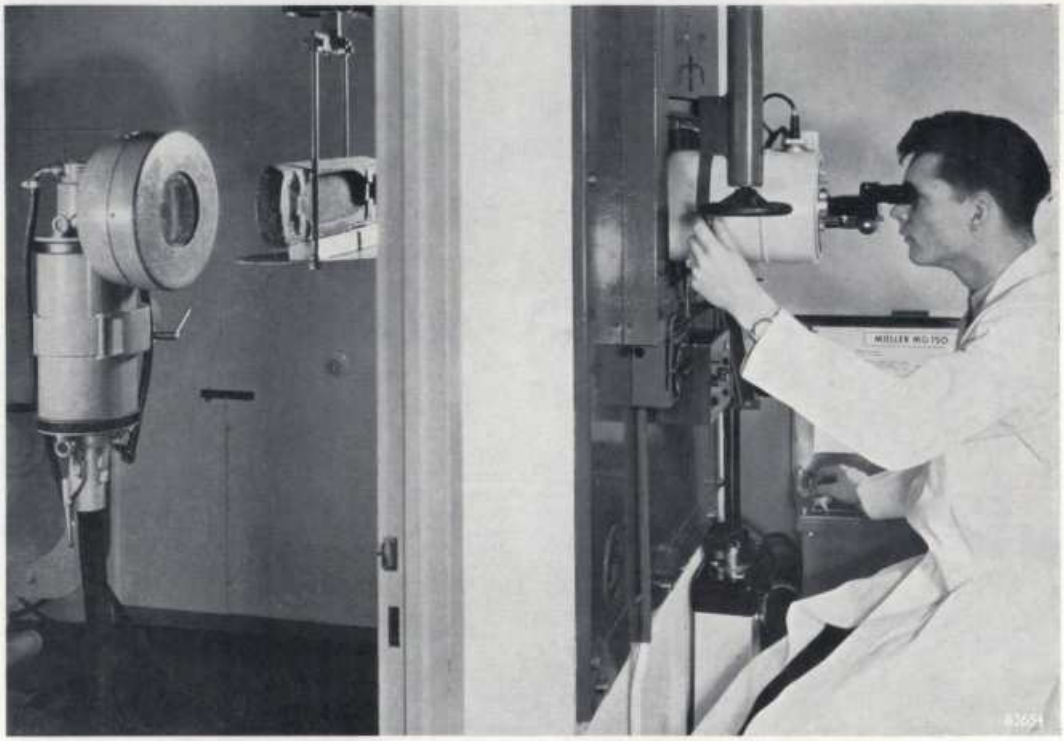


Fig. 2. Doorlichtingswand met ingebouwde röntgenbeeldversterker. De waarnemingsoptiek is in dit geval een binoculaire microscoop.

De verkregen beeldkwaliteit als functie van de materiaaldikte wordt weergegeven door de krommen van *fig. 3*. Bij de waarnemingen werden röntgenbuisspanningen toegepast tussen 80 kV (voor ca. 2 mm staal) en 150 kV (voor ca. 20 mm staal), en de doorlichting vond plaats bij daglicht. De focusafmetingen waren 0,4 × 0,4 mm. De diameter van de dunste te onderscheiden draad neemt langzamer

[2]) Zie ook G. Lang, Röntgendurchleuchtungseinrichtung mit Bildverstärker, Energie und Technik **6**, 163, 1954 (Juli). De aldaar besproken, in fig. 1 weergegeven opstelling werd verleden jaar op verschillende tentoonstellingen gedemonstreerd.

Tegelijkertijd met ons onderzoek zijn ook in het laboratorium der Philipsfabrieken te Balham (Engeland) systematische proeven over het materiaalonderzoek met de röntgenbeeldversterker gedaan; de resultaten daarvan zullen elders worden gepubliceerd.

[3]) De draadwaarneembaarheid is geen exacte maat voor de dwarsafmetingen van de kleinste waarneembare fout, aangezien deze nog afhangen van de vorm en de aard van de fout (gasinsluitsels, slak, scheuren, enz.). Ook als men de doorlichtingsmethode en de fotografische methode wat betreft beeldkwaliteit wil vergelijken, kan men de draadwaarneembaarheid slechts als een ruwe indicatie gebruiken, aangezien de situaties bij de waarneming sterk verschillen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dan evenredig met de doorstraalde dikte toe (bij kromme *1* bijv. bedraagt deze 0,3 mm bij 4 mm Fe en neemt slechts toe tot 0,8 mm bij 20 mm Fe). De hieruit volgende verbetering van de in % uitgedrukte beeldkwaliteit met toenemende dikte, die men in fig. 3 ziet, is analoog aan wat men bij de normale doorlichting vindt [4]). Het blijkt nu dat voor

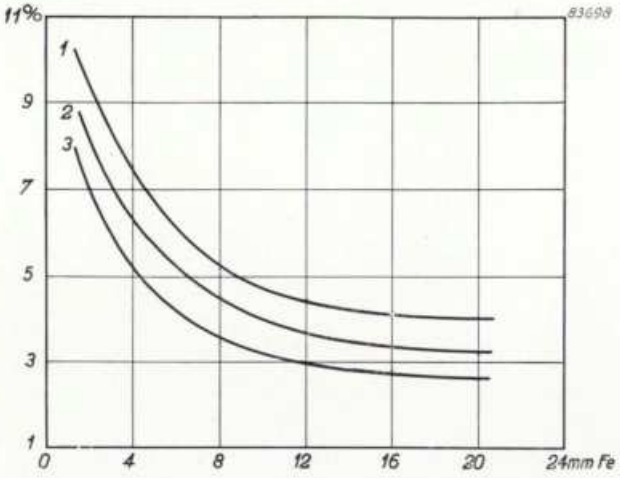


Fig. 3. Draadwaarneembaarheid in % bij doorlichting van staal met de röntgenbeeldversterker, als functie van de doorstraalde materiaaldikte in mm. De buisspanning bedroeg 80 tot 150 kV, de afstand van focus tot beeldversterker 50 cm, de focusafmetingen waren 0,4 × 0,4 mm. Er werd een vergrote röntgenschaduwbeeldprojectie toegepast; bij de krommen *1*, *2*, *3* bedroeg de vergrotingsfactor resp. 1,2, 1,6 en 2,2.

materiaaldikten boven 10 mm, die in de techniek het belangrijkst zijn, bij gebruik van de beeldversterker een draadwaarneembaarheid van 3% kan worden bereikt. Ter vergelijking zij vermeld dat bij de directe doorlichting met het doorlichtingsscherm (welke, zoals reeds gezegd, slechts uitvoerbaar is in het donker en tot ongeveer 8 mm staal en daarbij nog aanzienlijk hogere spanningen en vermogens van de röntgenbuis vereist) de draadwaarneembaarheid niet beter is dan 6%.

De genoemde draadwaarneembaarheid van 3% die men verkrijgt bij doorlichten met de beeldversterker, is voor de meeste doeleinden geheel voldoende. Bij het fotografisch röntgenonderzoek verkrijgt men nog betere beeldkwaliteiten, nl. tot ca. 1%. In vele gevallen echter wordt zulk een goede detailwaarneembaarheid niet geëist, en met het oog op de vermelde economische nadelen van de fotografische methode werd tot dusver in zulke gevallen vaak geheel afgezien van een röntgenonderzoek. De eenvoud en de goede prestaties van de doorlichtingsmethode met de röntgenbeeldversterker zal er wellicht toe leiden dat de röntgendoorlichting thans ook in de staalindustrie een plaats zal veroveren. Belangrijk is hiervoor ook dat men dank zij de betrekkelijk geringe vereiste röntgenintensiteiten met gemakkelijk uit te voeren maatregelen ter bescherming van het personeel tegen de röntgenstralen kan volstaan.

De bovenstaande resultaten hebben betrekking op ene normale afstand van focus tot beeldversterker, nl. 50 cm. Deze grote afstand maakt het mogelijk met vergrote röntgenschaduwbeeldprojectie te werken; het voordeel van deze methode, die bij doorlichting van lichte metalen reeds lang wordt toegepast, komt in fig. 3, krommen *2* en *3*, duidelijk tot uiting. Bij grote materiaaldikten kan in plaats van de vergrote projectie ook een vermindening van de genoemde afstand een verbeterde beeldkwaliteit opleveren, dank zij de hierdoor verkregen grotere schermhelderheid. Brengt men de afstand terug tot ca. 20 cm (dichter bij het focus kan men niet komen ten gevolge van de afmetingen van het omhulsel van de röntgenbuis), dan kan men nog een stalen wand met een dikte tot 30 mm doorlichten, bij een beeldkwaliteit van ca. 3%. Proeven waarbij op dezelfde afstand met een groter focus en groter vermogen van de röntgenbuis werd gewerkt, hebben aangetoond dat het zelfs mogelijk is 40 mm staal te doorlichten, zij het dan met verminderde beeldkwaliteit.

Er zij hier nog op gewezen dat men erop moet letten, dat het röntgenscherm van de beeldversterker niet getroffen wordt door onverzwakte primaire straling. De verblindende helderheid die men dan plaatselijk op het kijkscherm krijgt en het daarmee gepaard gaande nalichten, zijn nadelig voor de beeldkwaliteit van het gehele beeld.

Bij het doorlichten van een dikke stalen wand ziet men het beeld enigszins onrustig worden („ruisen"), wat daaraan toe te schrijven is dat door de selectieve absorptie in het staal de röntgenstraling veel kortgolviger en zwakker geworden is en dus uit een betrekkelijk gering aantal grote quanta bestaat (zie artikel II). Dit effect heeft geen merkbare nadelige invloed op de beeldkwaliteit.

Tot slot willen wij hier nog enige practische gevallen noemen waarin de toepassing van de röntgenbeeldversterker voor de doorlichting van staal reeds werd beproefd.

De eerste ons bekende toepassing in de industrie heeft de beeldversterker gevonden bij het vaststellen van het vloeistofniveau in stalen drukflessen. Het

[4]) Het effect is daaraan te danken dat de geometrische onscherpte en de door het röntgenscherm veroorzaakte onscherpte van het beeld, die bij dunne draden (geringe wanddikte) een grens stellen aan de draadwaarneembaarheid, bij dikke draden (grote wanddikte) minder invloed hebben. Weliswaar krijgt men tegelijk een toeneming van de in het doorstraalde materiaal verstrooide röntgenstraling, die de contrasten vermindert, maar klaarblijkelijk overheerst de eerstgenoemde factor.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

is mogelijk bij 130 kV buisspanning en 6 mA buisstroom het vloeistofniveau zelfs bij daglicht visueel op het kijkscherm van de beeldversterker waar te nemen. De totale doorstraalde wanddikte bedroeg daarbij 6 mm. Proeven in het laboratorium hebben aangetoond dat dit procédé ook nog bij een wanddikte van de stalen flessen van 6 mm, dus bij een totale dikte van 12 mm staal, kan worden toegepast.

Verdere toepassingsmogelijkheden van de nieuwe doorlichtingsmethode zien wij in het onderzoek van stalen kussenblokken. *Fig. 4* geeft een röntgenfoto (op kleinbeeldformaat) weer van een visueel met de beeldversterker gevonden fout in een kussenblok van 13 mm dikte. *Fig. 5* (eveneens kleinbeeldformaat) toont op dezelfde manier gevonden fouten in een lasnaad van een stalen plaat ter dikte van 15 mm. Zoals te verwachten was (vergelijk artikel II in deze serie), is de beeldkwaliteit van deze kleinbeeldfoto's nog iets beter dan de visueel verkregen kwaliteit volgens fig. 3.

Belangrijke toepassingsmogelijkheden voor de doorlichting met de röntgenbeeldversterker vallen

83770

Fig. 4. Foto gemaakt met de beeldversterker van een half kussenblok; de stralen gingen door 10 mm staal + 3 mm aslegerbrons. Men ziet duidelijk een loodafscheiding. Gegevens van de röntgenbuis: 150 kV, 3 mA; focusafmetingen 0,4 × 0,4 mm. Belichtingstijd 20 sec.

83771

Fig. 5. Foto gemaakt met de beeldversterker van een lasnaad in een 15 mm dikke staalplaat. Men ziet fouten in de naad. Voorts ziet men de schaduw van het vóór de plaat geplaatste DIN-testobject. Gegevens van de röntgenbuis: 140 kV, 3 mA; focus 0,4 × 0,4 mm. Belichtingstijd 15 sec.

ook te voorzien bij het onderzoek van buizen met gelaste langsnaad, die bijv. worden gebruikt voor gas-, olie- of waterleidingen over grote afstand. In deze producten van massafabricage heeft men een typisch geval waar men tot dusverre, omdat het röntgenonderzoek langs fotografische weg te kostbaar was, in het geheel geen keuring verrichtte. De opstelling voor het doorlichten van de 8-10 meter lange buizen zal men zo kunnen maken, dat de röntgenbuis aan een lange arm binnen in de te onderzoeken buis wordt vastgehouden. De röntgenbuis straalt door de lasnaad heen naar buiten op de beeldversterker. De te onderzoeken buis wordt met haar wand tussen de vast opgestelde beeldversterker en de röntgenbuis door bewogen. In een dergelijke opstelling kan men heel goed met afstanden van niet meer dan 20 cm tussen focus en beeldversterker werken, en volgens voorlopige proeven kan men continu een naadlengte van ongeveer 5 cm per seconde onderzoeken. Een soortgelijke onderzoekmethode zal wellicht ook kunnen worden toegepast bij de vervaardiging van overlangs gelaste stalen balken.

Samenvatting I-VI. In deze serie artikelen over de toepassing van de röntgenbeeldversterker wordt begonnen met een beschrijving van de werking van de beeldversterkerbuis (I). In deze buis wordt de helderheid van het röntgenschaduwbeeld op het fluorescentiescherm 800 tot 1200 maal versterkt. Deze helderheidsversterking kan zowel gebruikt worden om betere waarnemingsomstandigheden voor het oog te verkrijgen, als om de benodigde röntgenintensiteit te verminderen. Dat dit laatste niet ongestraft zeer ver gedreven mag worden, vindt men in artikel II uiteengezet. Vermindert men nl. de intensiteit van de röntgenstralen zeer sterk, dan zullen de fluctuaties in het aantal röntgenquanta zichtbaar worden en de waarneming van details storend beïnvloeden. Een kwantitatieve vergelijking van de doorlichting met en zonder beeldversterker, de directe röntgenfoto, de röntgencamerafotografie en de fotografie met de beeldversterker leert, dat onder practische omstandigheden o.a. bij de doorlichting de detail-waarneembaarheid vrijwel door de fluctuaties wordt bepaald, terwijl dit bijv. bij de directe röntgenfoto en bij de beeldversterkerfoto op fijnkorrelige film niet het geval is.

In artikel III worden de verschillende optische hulpmiddelen besproken welke men kan gebruiken om het verkleinde schermbeeld van de beeldversterkerbuis, zonder noemenswaardig helderheidsverlies voor de waarneming, te vergroten. Ook de optieken voor het zo gunstig mogelijk fotograferen of filmen van het schermbeeld komen hier aan de orde. Nader

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

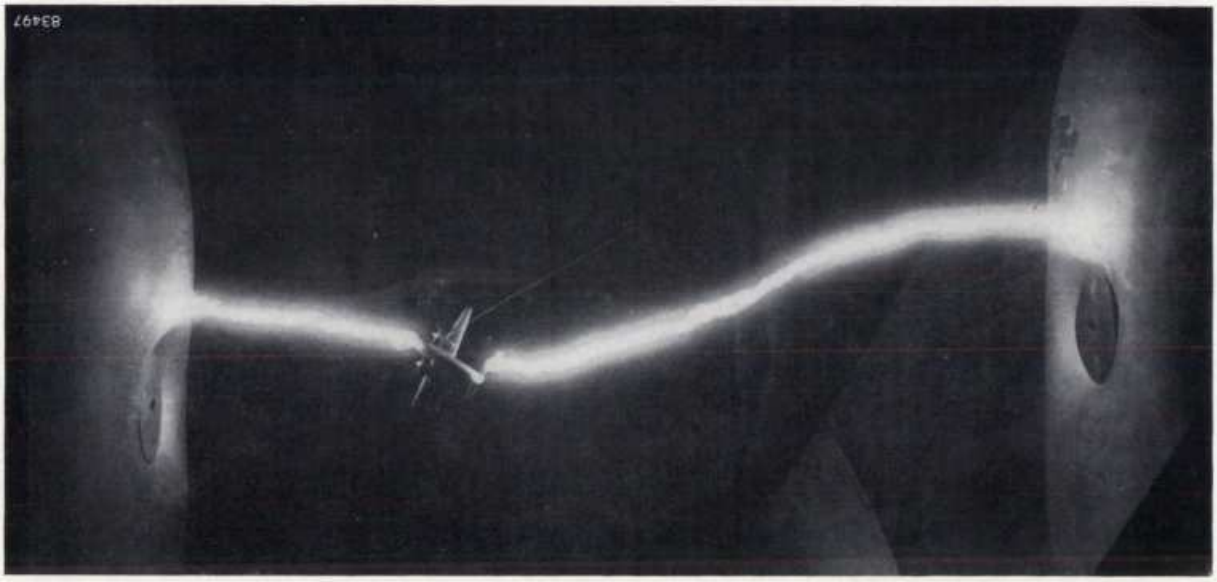
www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

worden beschreven: een binoculaire microscoop voor doorlichten; een geknikte microscoop met grote, vrij in de ruimte staande uittreepupil, welke met het oog gemakkelijk kan worden gevonden door een bewegelijk matglazen plaatje; een tandem-lenssysteem, bestaande uit twee normale, lichtsterke, fotografische objectieven, voor het fotograferen van het kleine kijkscherm (15 mm Ø) van de beeldversterker op kleinbeeldformaat. Artikel IV beschrijft een periscopische waarnemingsoptiek, met behulp waarvan de beeldversterker op een normale universele onderzoektafel voor röntgendiagnostiek kan worden gebruikt. Dank zij een draaibare inkijkopening kan de arts tijdens het kantelen van de patient het röntgenbeeld in normale stand en zonder beelddraaiing blijven waarnemen.

Ten slotte wordt in de twee laatste artikelen (V, VI) de toepassing in de practijk uitvoeriger behandeld. Het blijkt hierin dat zowel bij het medisch onderzoek als in de industrie bij het materiaalonderzoek, het beperkte gezichtsveld van de buis geenszins een bezwaar voor toepassing behoeft te vormen. Wat betreft de medische toepassing, wordt in V een enigszins systematisch overzicht gegeven van de lichaamsdelen of orgaanfuncties waarbij met voordeel de beeldversterker voor het onderzoek kan worden gebruikt. Nadruk wordt gelegd op het grote nut van de beeldversterker voor allerlei onderzoekingen met behulp van contrastvloeistoffen en op de ontwikkeling van de röntgencinematografie, die pas door de beeldversterker goed mogelijk geworden is. Enkele voorbeelden van reeds gemaakte röntgenfilms worden gegeven, o.a. een opname van de twaalfvingerige darm, waarbij de totale dosis op de patient voor een film van 2 minuten (ca. 1000 beeldjes) slechts 50 r bedroeg. Bij het onderzoek naar de industriële toepassingsmogelijkheden van de beeldversterker (artikel VI) is o.a. gevonden dat hiermee stalen constructie-elementen van 20 mm dikte nog gemakkelijk bij daglicht kunnen worden doorgelicht, waarbij een detail van 3% van de materiaaldikte nog waarneembaar bleek te zijn. Voor grovere details is zelfs doorlichting van 40 mm dikke stalen werkstukken mogelijk gebleken.

BLIKSEMINSLAG IN VLIEGTUIGEN

551.594.221.629.315



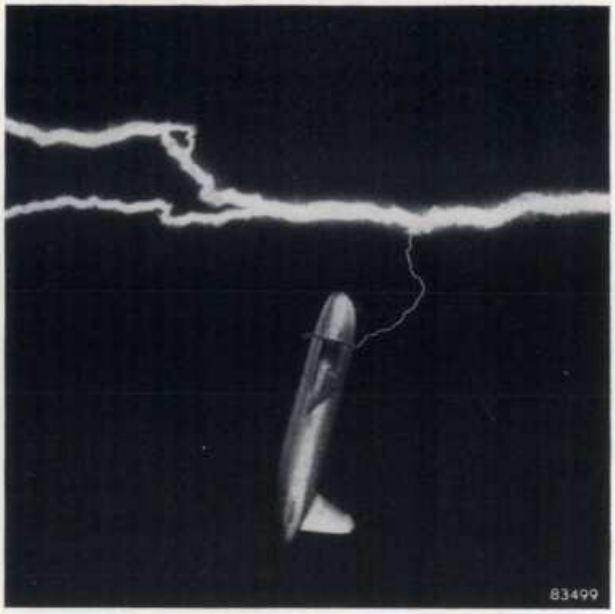
Het heftige atmosferische verschijnsel dat men met de naam onweder pleegt aan te duiden, speelt zich af in een zo uitgestrekte ruimte dat het nabootsen hiervan door experimenten op verkleinde schaal in het laboratorium een hachelijke onderneming moet schijnen.

Toch is het soms, als men zich slechts voor bepaalde trekken van het verschijnsel interesseert, mogelijk experimenten op verkleinde schaal op te zetten waarin het verschijnsel op de essentiële punten analoog verloopt. Een voorbeeld hiervan is het veelvuldig toegepaste onderzoek van isolatoren en transformatoren voor hoogspanningsleidingen door middel van stootspanningen. Daarbij worden in het bijzonder de gevolgen van een blikseminslag ergens op een leiding onderzocht.

De hier weergegeven foto's illustreren enige fazen van een ander onderzoek, dat niet lang geleden te Eindhoven op verzoek van belanghebbenden is uitgevoerd. Het ging in dit geval om de vraag, welke delen van een in een onweersgebied vliegend vliegtuig bij voorkeur door de bliksem getroffen zouden worden. Het is gebleken dat, naarmate de vliegtuigen sneller en groter worden, zulk een blikseminslag vaker optreedt. Al veroorzaakt blikseminslag in een vliegtuig slechts uiterst zelden ongevallen, toch berokkent hij vaak, betrekkelijk geringe, schade aan het vliegtuig. Tot behoud van de volledige luchtvaardigheid zal men dan de schade vóór de eerstvolgende opstijging willen repareren, hetgeen tijdverlies betekent — een in de luchtvaart verafschuwd begrip.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Om een antwoord op de gestelde vraag te vinden, werd een vliegtuigmodel, schaal 1 : 100, geïsoleerd opgehangen tussen twee hoogspanningselectrodes (met afmetingen van enige meters, zie titelfoto). Eén electrode wordt met de aarde verbonden, de andere met de hoogspanningspool van een cascadegenerator [1]), waardoor ze op een positieve potentiaal van ca. 1 millioen volt ten opzichte van aarde wordt gebracht. De afstanden zijn zo gekozen dat nog juist geen electrische overslag tussen de electrodes optreedt. Er zijn alleen sproeiverschijnselen (coronaontlading), te wijten aan de onvermijdelijke oneffenheden van de electrodes, stofjes op het oppervlak en derg.; ook aan het vliegtuigmodel zijn soms sproeiverschijnselen waar te nemen. De totale grootte van zulke sproeistromen is zeer gering (een fractie van 1 mA). In de ruimte tussen de electrodes, rondom het vliegtuigmodel, heerst echter een kritieke, electrisch „gespannen" toestand, waarin een geringe verandering een ontlading teweeg kan brengen. Een dergelijke toestand, op het randje van een ontlading, zal ook in werkelijkheid kunnen heersen rondom een vliegtuig dat zich bevindt in een onweer. Voor de ontlading is dan het wachten op een toevallig optredende factor die gedurende korte tijd ergens de veldsterkte aanzienlijk vergroot. Bij de experimenten, die voldoende „blikseminslagen" voor het opstellen van een statistiek moesten opleveren, was het telkens wachten op een toevallige verstoring natuurlijk ondoenlijk. De verstoring konden wij echter zelf introduceren, nl. door met een windbuks een loden kogeltje tegen de op hoge spanning staande electrode te schieten. Was de spanning hoog genoeg gekozen, dan werd vrijwel door ieder schot een ontlading geprovoceerd [2]).

Bij de aldus geprovoceerde overslagen koos de ontlading niet steeds, maar toch in vele gevallen, haar weg via het vliegtuigmodel. Een enkele maal werd het model getroffen door een zich van de hoofdontlading aftakkende „bijontlading" (zie foto) een verschijnsel dat men ook uit waarnemingen van natuurlijke bliksemontladingen kent.

De plaats waar de ontlading het vliegtuigmodel trof, werd bij de experimenten fotografisch vastgelegd. Het model werd in alle mogelijke ruimtelijke standen ten opzichte van het electrische veld geplaatst. Uit vele honderden foto's werd aldus een overzicht gekregen over de delen van het model waar de ontlading bij voorkeur insloeg.

Op grond van dergelijke experimenten zal men wellicht in de toekomst vliegtuigen kunnen voorzien van op bepaalde plaatsen aan te brengen bliksemafleiders, die tegen inslagen bestand zijn en aldus beschadigingen van de vliegtuigen en andere inconvenienten zullen helpen voorkomen.

A. C. van DORSTEN.

[1]) Zie bijv.: A. Kuntke, Philips techn. T. **2**, 161, 1937; A. Bouwers en F. A. Heyn, Philips techn. T. **6**, 46, 1941.

[2]) Het verschijnsel dat men door een snelle mechanische verstoring een ontlading kan veroorzaken over een afstand waarvoor de aangelegde spanning eigenlijk te laag is, werd voor zover bekend het eerst waargenomen en bestudeerd door A. Kuntke in het Laboratorium van C. H. F. Müller te Hamburg; zie VDE-Fachberichte **12**, 157-164, 1948.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

EEN EENVOUDIGE EN BETROUWBARE IONISATIEMANOMETER

door E. BOUWMEESTER en N. WARMOLTZ. 531.788.74

Sedert Buckley in 1916 voor het eerst een ionisatiemanometer construeerde en beschreef, is een groot aantal uitvoeringsvormen van de manometerbuis, zowel als van de daarbij behorende electronische apparatuur, bedacht. Door de voor- en nadelen van de verschillende systemen tegen elkaar af te wegen, zijn de auteurs gekomen tot een combinatie van, op zichzelf bekende, schakelingen en details, die een eenvoudig, betrouwbaar en redelijk nauwkeurig meetapparaat oplevert.

Principe van de ionisatiemanometer

Onder de vele methodes voor het meten van lage gasdrukken [1]), ongeveer in het gebied van 10^{-2} tot 10^{-8} mm Hg, is die met een ionisatiemanometer nog steeds een van de nauwkeurigste en, bij deze nauwkeurigheid, gemakkelijkst hanteerbare. Het principe moge hier in herinnering worden gebracht.

De glazen manometerbuis wordt gesmolten aan de installatie waarin men de druk wil meten. In de buis bevinden zich gewoonlijk drie electrodes (*fig. 1*), nl. een kathode *f*, die electronen emitteert,

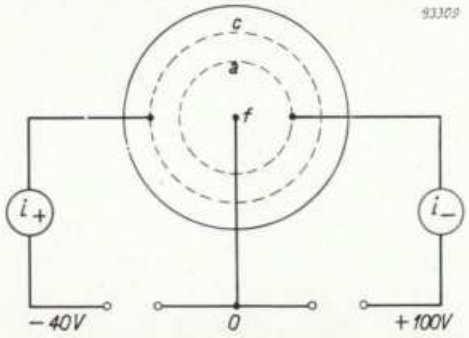


Fig. 1. Principe van de ionisatiemanometer. De door de kathode *f* geëmitteerde electronen worden door de anode *a* (uitgevoerd als rooster) versneld en komen ten slotte hierop terecht; zij leveren de stroom i_-. De gevormde ionen komen terecht op de ionencollector *c* en leveren de stroom i_+.

en twee coaxiaal daarmee opgestelde electrodes *a* en *c*. De roostervormig uitgevoerde electrode *a* (de anode) krijgt een positieve spanning van bijv. 100 V ten opzichte van de kathode, terwijl de electrode *c* een negatieve spanning krijgt van bijv. −40 V. Het electrische veld tussen *f* en *a* versnelt de electronen. Een aantal ervan schieten één- of meermalen door de anode heen; zij beschrijven zodoende een lange weg alvorens op *a* terecht te komen en ioniseren daarbij een gedeelte van de in de ballon aanwezige gasmoleculen. De positieve ionen, althans voor zover zij tussen *a* en *c* worden gevormd, komen terecht op *c*, welke electrode daarom „ionencollector" wordt genoemd [2]).

Het aantal gevormde ionen is zowel evenredig met de gasdichtheid, dus met de gasdruk, als met de ioniserende electronenstroom. Is deze laatste constant, dan is de over *c* vloeiende stroom een maat voor de gasdruk.

Twee belangrijke problemen doen zich voor bij het ontwerp van een ionisatiemanometer: de instelling en stabilisatie van de electronenstroom, en de meting van de, veelal zeer kleine, ionenstroom (tot de orde van 10^{-11} A). Wij zullen de oplossingen beschrijven die zijn gekozen in een ionisatiemanometer die in het Natuurkundig Laboratorium te Eindhoven, en ook elders, reeds geruime tijd met veel succes wordt gebruikt (*fig. 2*) [3]). Vervolgens zullen wij de ijkgrafieken bespreken en enige maatregelen noemen die zijn genomen om de nauwkeurigheid van de aflezing bij lage drukken (tot 10^{-8} mm Hg) te vergroten.

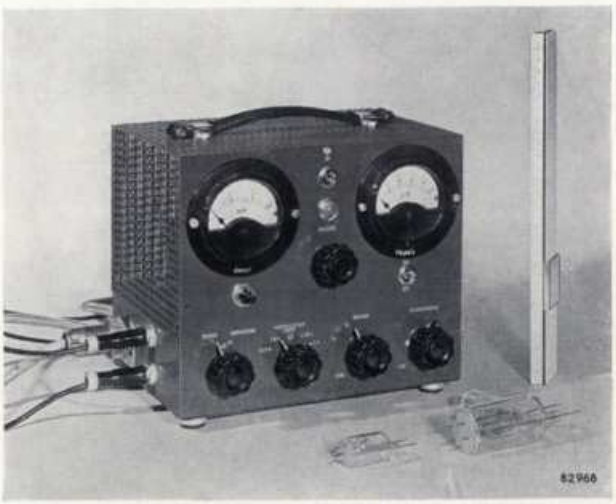


Fig. 2. De ionisatiemanometer, met op de voorgrond twee exemplaren van de manometerbuis, één van een groot en één van een klein type.

[1]) Een systematisch overzicht van deze methodes vindt men bijv. bij F. M. Penning, Manometers voor lage gasdrukken, Philips techn. T. **2**, 201-208, 1937.

[2]) Soms laat men *c* de functie van anode en *a* die van collector vervullen.

[3]) Een korte beschrijving van het instrument in een vroeger stadium van ontwikkeling is reeds gegeven in: N. Warmoltz en E. Bouwmeester, An easily degassable ionisation gauge, Appl. sci. Res. **B2**, 273-276, 1951.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Instelling en stabilisatie van de electronenstroom

Gebruikt men als ioniserende electronenstroom de verzadigingsstroom van de kathode — door de anodespanning een voldoend hoge waarde te geven —, dan hebben schommelingen van de anodespanning geen invloed op de ijking. Men heeft echter een schakeling nodig om deze verzadigingsstroom op de gewenste waarde constant te houden door automatische regeling van de gloeistroom. Deze regeling vereist meestal een versterkbuis en twee regelbuizen en is dus vrij gecompliceerd [4]). Laat men de anodestroom door de ruimtelading begrenzen, dan is de stroom nagenoeg onafhankelijk van de kathodetemperatuur opzichte van aarde. De rimpel op de anodestroom, die optreedt doordat de potentiaalverdeling langs de direct verhitte kathode met de netfrequentie varieert en die 10 tot 15% bedraagt van de gemiddelde waarde indien geen tegenkoppeling wordt toegepast, wordt door de tegenkoppeling tot 1 à 2% teruggebracht.

De manometer is geijkt bij twee meetwaarden van de electronenstroom, nl. bij 0,5 en bij 2,5 mA. De laatste waarde wordt toegepast bij lage drukken, daar de gevoeligheid nu ca. vijf maal groter is. Men stelt deze meetwaarden, die men op de meter M_1 (fig. 3) kan aflezen, in door de kathodeweerstand

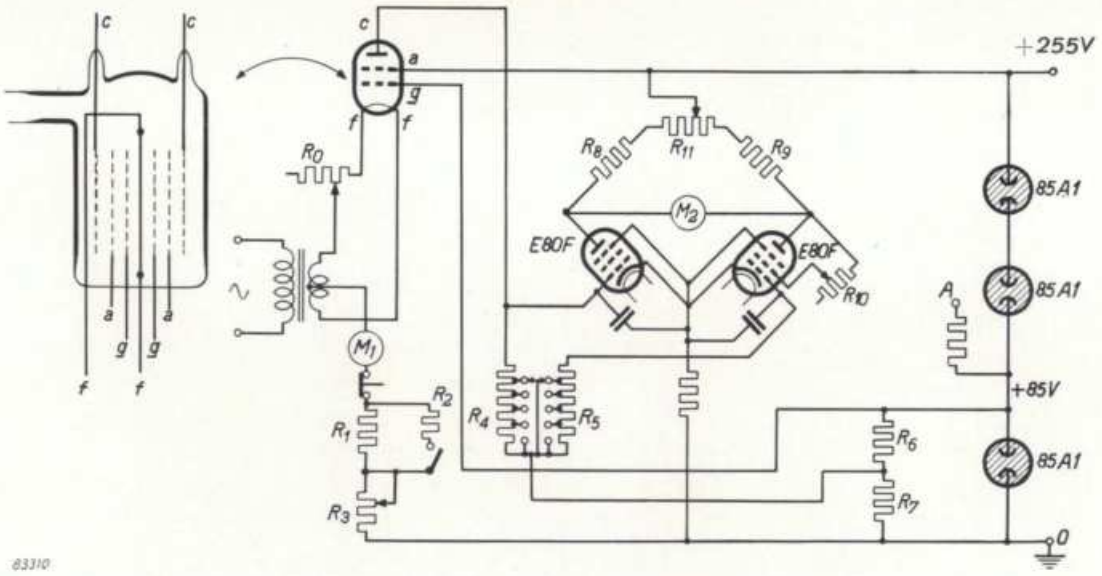


Fig. 3. Schakelschema van de ionisatiemanometer. De manometerbuis is als een normale tetrode getekend. Links is deze buis nog eens afzonderlijk geschetst op een wijze die iets meer met de werkelijkheid overeenstemt. De glazen wand is bedekt met een geleidende, geaarde laag, uitgezonderd de dun getekende gedeelten. De meter M_1 wordt gebruikt bij het instellen van de ioniserende electronenstroom; de druk wordt afgelezen op M_2.

(mits deze niet zo laag wordt dat toch verzadigingsverschijnselen optreden). Door ons is, in navolging van C. G. en D. D. Montgomery [5]), een verbeterde variant van laatstgenoemde methode toegepast. Tussen de kathode f en de anode a is het rooster g aangebracht (*fig. 3*). Deze drie electrodes vormen een triode, waarbij men de anodestroom op eenvoudige wijze, door tegenkoppeling via een geschikt gekozen weerstand in de kathodeleiding, kan stabiliseren. De potentialen van stuurrooster en anode zijn beide gestabiliseerd met behulp van spanningsstabiliseerbuizen 85 A1, resp. op + 85 en + 255 V ten opzichte van aarde. De rimpel op de anodestroom, die optreedt doordat de potentiaalverdeling langs de direct verhitte kathode met de netfrequentie varieert en die 10 tot 15% bedraagt van de gemiddelde waarde indien geen tegenkoppeling wordt toegepast, wordt door de tegenkoppeling tot 1 à 2% teruggebracht.

De manometer is geijkt bij twee meetwaarden van de electronenstroom, nl. bij 0,5 en bij 2,5 mA. De laatste waarde wordt toegepast bij lage drukken, daar de gevoeligheid nu ca. vijf maal groter is. Men stelt deze meetwaarden, die men op de meter M_1 (fig. 3) kan aflezen, in door de kathodeweerstand met R_3 te regelen. De electrodenconfiguratie in de manometer is zo gekozen dat bij deze meetwaarden de kathode f iets positief wordt ten opzichte van g.

De kathodeverzadigingsemissie moet met behulp van de gloeistroom worden ingesteld op een waarde die enigszins (bijv. 0,5 mA) boven de meetwaarde van de electronenstroom ligt. De voor deze emissie vereiste kathodetemperatuur, en dus ook de nodige gloeistroom, hangt echter af van de uittreearbeid van de electronen uit het kathodeoppervlak, welke uittreearbeid op zijn beurt in hoge mate wordt beïnvloed door de in de manometer aanwezige gassoorten. Zo wordt door zuurstof de uittreearbeid sterk vergroot (vergiftiging van de kathode); bij aanwezigheid van dit gas moet derhalve de kathodetemperatuur veel hoger zijn dan wanneer de buis bijv. met zuiver argon is gevuld.

---

[4]) J. W. A. van der Scheer, Een universeel voedingsapparaat voor ionisatiemanometers, Het P.T.T.-bedrijf **3**, 24-29, 1950.

[5]) C. G. en D. D. Montgomery, A grid controlled ionisation gauge, Rev. sci. Instr. **9**, 58, 1938.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Door de vereiste kathodetemperatuur is de nodige gloeistroom echter nog niet vastgelegd. Ook de warmteafgifte van de kathode aan de omgeving, welke afgifte zowel van de gasdruk als van de gassoort afhangt, heeft invloed. Blijkbaar hangt dus de gloeistroom, nodig om de gewenste emissie te veroorzaken, af van vele veranderlijke factoren. Ten einde niet het gevaar te lopen de kathodetemperatuur onnodig hoog te maken en daardoor de levensduur van de kathode te verkorten,

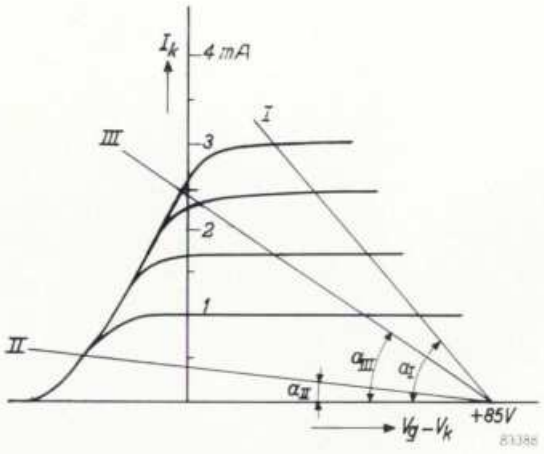


Fig. 4. De stroom I_k door de kathodeleiding van de ionisatiemanometer als functie van de spanning $V_g - V_k$ tussen het stuurrooster en de kathode, voor verschillende waarden van de verzadigingsemissie van de kathode, en constante stuurrooster- en anodepotentiaal (resp. + 85 V en + 255 V ten opzichte van aarde). Het instelpunt van de triode wordt op de gebruikelijke manier gevonden als snijpunt van de geldende karakteristiek met een rechte (de werklijn), getrokken door het punt + 85 V op de abscis. (Dit punt ligt in werkelijkheid veel verder naar rechts dan in deze schematische tekening het geval is.) De werklijn maakt met de abscis een hoek α; cotg α is gelijk aan de weerstand tussen kathode en aarde. Is deze weerstand klein (R_2 parallelgeschakeld aan R_1, en R_3 geheel kortgesloten, zie fig. 3), dan vloeit de verzadigingsstroom (werklijn *I*). Bij afgeschakelde R_2 geldt cotg $\alpha_{II} = R_1 + R_3$; met R_3 kan men nu de kathodestroom precies op 0,5 mA instellen (werklijn *II*). Bij ingeschakelde R_2 kan met R_3 de werklijn in positie *III* worden gebracht; is de verzadigingsemissie voldoende groot, dan bedraagt de anodestroom nu 2,5 mA.

is het gewenst de verzadigingsemissie rechtstreeks te kunnen aflezen en instellen. Zoals uit *fig. 4.* blijkt, is dit mogelijk door de kathodeweerstand tijdelijk te verlagen, waartoe men R_2 aan R_1 parallel kan schakelen (zie fig. 3). De meter M_1 wijst dan de verzadigingsemissiestroom aan. Met behulp van R_0 regelt men vervolgens de gloeistroom totdat de verzadigingsemissie de gewenste waarde heeft.

Meting van de ionenstroom

De ionencollector c is via de meetweerstand R_4 (fig. 3) verbonden met een punt dat een spanning van ca. + 42,5 V heeft ten opzichte van aarde ($R_6 = R_7$). De collector is dus ongeveer 212,5 V negatief ten opzichte van de anode, en trekt dus inderdaad de positieve ionen aan die voorbij de anode worden gevormd.

De over de meetweerstand veroorzaakte spanning wordt toegevoerd aan het stuurrooster van een radiobuis E 80 F, en beïnvloedt dus de stroom door deze buis. De meetweerstand kan worden ingesteld op vijf waarden, die telkens een factor 10 verschillen. Bij elke meetwaarde van de electronenstroom worden dus vijf meetgebieden bestreken.

De stroom door de buis wordt echter niet rechtstreeks benut als maat voor de te meten ionenstroom. De veranderingen, veroorzaakt in de buisstroom, zijn namelijk slechts zeer gering en fluctuaties in deze stroom, bijv. door onvolkomen stabilisatie van de buisvoedingsspanningen, zouden grote fouten in de aflezing opleveren. Om dit te voorkomen is de buis, als één der takken, opgenomen in een brug van Wheatstone. De drie andere takken bestaan resp. uit een dergelijke buis en de weerstanden R_8 en R_9. De stroom door een µA-meter M_2 (100 µA volle uitslag), geschakeld tussen de anodes van de twee buizen, is een maat voor de ionenstroom en dus voor de druk. Eventuele fluctuaties in de voedingsspanningen hebben nagenoeg dezelfde uitwerking op de twee buizen en verstoren het brugevenwicht niet. Deze methode om de ionenstroom te meten is afkomstig van Laferti[6]). Er zijn voorzieningen getroffen die het mogelijk maken de brug zodanig in te stellen dat: 1) M_2 op nul staat (de brug in evenwicht is) indien geen ionen worden gevormd, wat het geval is als de ioniserende electronenstroom wordt onderbroken met de schakelaar onder M_1; 2) de gevoeligheid een zodanige waarde heeft dat de op M_2 afgelezen waarden kloppen met de ijkgrafiek (stroom door M_2 als functie van de gasdruk). Het laatste geschiedt hier door te zorgen dat bij een vaste spanning aan het stuurrooster van de eerste buis (verkregen door het ijkpunt *A* met dit stuurrooster te verbinden), M_2 een voorgeschreven uitslag krijgt. Om aan de twee genoemde voorwaarden gelijktijdig te kunnen voldoen, zijn twee onderling onafhankelijke instelmogelijkheden noodzakelijk, die hier worden verschaft door de regelweerstanden R_{10} en R_{11}. Met R_{10} regelt men de schermroosterspanning van de tweede buis (dus de karakteristiek van deze buis), en met R_{11} heeft men de verhouding der twee weerstandstakken van de brug in de hand. Het is noodzakelijk gebleken ervoor te zorgen dat de roosterweerstanden R_4 en R_5 van de twee buizen steeds onderling gelijk zijn. De spanningen, veroorzaakt door de roosterstromen over de roosterweer-

[6]) S. Dushman, Scientific foundations of vacuum technique, J. Wiley, New York 1949, blz. 361.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

standen, welke roosterstromen in hoofdzaak afkomstig zijn van positieve ionen gevormd uit de restgassen in de beide radiobuizen, zouden anders de verrichte instellingen verstoren bij overschakelen. op een ander meetgebied.

De ijkgrafieken

De manometerbuis wordt uitgevoerd in twee typen, resp. met 50 en met 10 cm³ inhoud (zie fig. 2). Het kleine type is speciaal ontwikkeld voor metingen van lawinevorming. Op zichzelf beïnvloedt dit de bruikbaarheid in dit gebied niet.

De ijkkrommen zijn tot ca. 10^{-4} mm Hg verkregen door ijking tegen een nauwkeurige McLeod-manometer. Naar lagere drukken zijn deze metingen geëxtrapoleerd.

Maatregelen ter vergroting van de nauwkeurigheid bij lage drukken

Bij de ontwikkeling van de manometer heeft

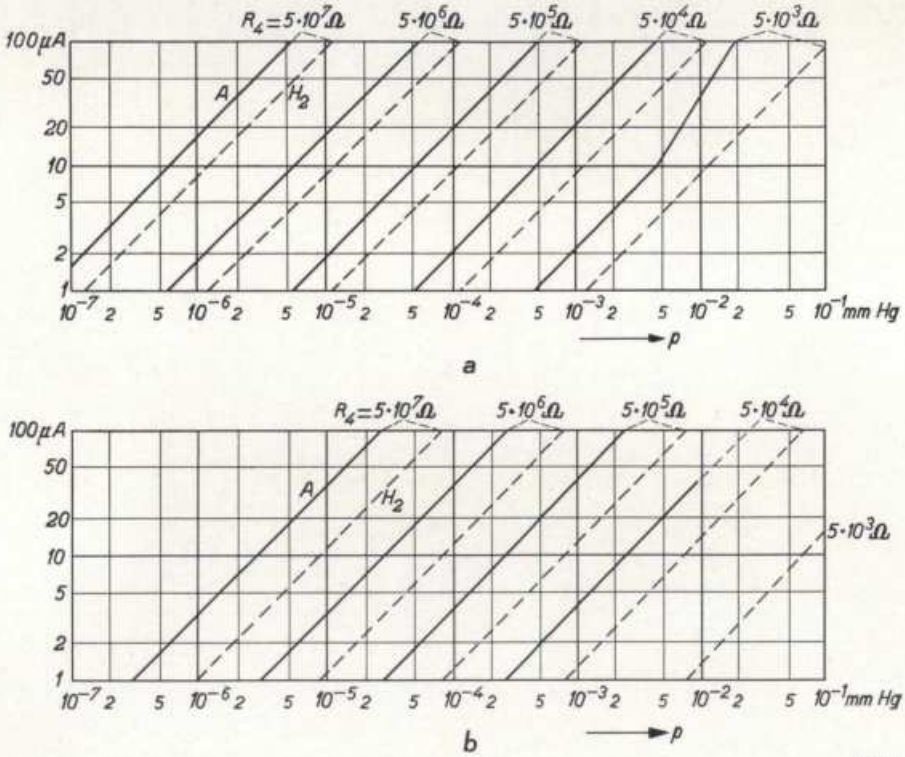


Fig. 5. De ijkgrafieken voor het grote type (*a*) en voor het kleine type manometerbuis (*b*). De getrokken lijnen gelden voor argon (A), de gestippelde voor waterstof (H_2). De ioniserende electronenstroom was 0,5 mA. De waarde van de verzadigingsemissie heeft bij drukken boven $5\cdot10^{-3}$ mm Hg enige invloed op de ijking. Deze verzadigingsemissie was hier 1 mA. Zowel de druk p als de op M_2 (zie fig. 3) afgelezen stroom (dus *niet* de ionenstroom zelf!) is op logarithmische schaal uitgezet. Alleen een rechte lijn onder 45° betekent dan evenredigheid tussen druk en stroom, zodat hier de stroom iets sneller dan evenredig met de druk toeneemt. De waarden van de meetweerstand R_4, corresponderende met de verschillende gedeelten van de grafieken, zijn bijgeschreven. Stelt men de ioniserende electronenstroom in op 2,5 mA, dan kan men tot ca. 10^{-8} mm Hg meten. De ionenstroom zelf kan men berekenen met behulp van de bruggevoeligheid, die 760 μA/V bedraagt, en de waarde van R_4.

aan vaten met gering volume. *Fig. 5* bevat de ijkgrafieken voor beide typen, voor een ioniserende electronenstroom van 0,5 mA en voor de gassen argon en waterstof [7]). De gemeten stroom neemt iets sneller dan evenredig met de druk toe. In het gebied der hogere drukken (bij enige malen 10^{-3} mm Hg) wordt bij het grote type, voor argon, de afwijking van de evenredigheid aanzienlijk sterker. Vermoedelijk wordt dit veroorzaakt door een begin steeds als leidraad gegolden dat het instrument robuust en eenvoudig moest zijn. Het is dan ook vermeden deze eigenschappen op te offeren aan een uitbreiding van het meetgebied tot drukken beneden 10^{-8} mm Hg, de grens die voor dit type meter normaal is. Wel zijn enige maatregelen genomen om de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de aflezing in het laagste meetgebied te vergroten:

1) De wand van de glazen buis, waarin het electrodensysteem is gemonteerd, is inwendig geleidend gemaakt en geaard, uitgezonderd de gedeelten in

[7]) Zoals bekend (zie bijv. het in noot [1]) aangehaalde artikel), hangt de ijkgrafiek af van de aanwezige gassoort.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de omgeving der electrodedoorvoeringen. Positieve ionen, die aan de wand — waar steeds vele geadsorbeerde gasatomen aanwezig zijn — worden gevormd door licht afkomstig van de gloeiende kathode, kunnen nu niet naar de collector komen, daar de collector positief is ten opzichte van aarde. Bovendien vermijdt men het ontstaan van wandladingen, die de potentiaalverdeling in de manometerbuis op oncontroleerbare wijze zouden beïnvloeden en die vooral bij lage drukken zeer storend zijn.

2) De ionencollector is door twee uitstulpingen op de kop van de buis heen naar buiten uitgevoerd, waardoor lekstromen tussen de collector en de andere electrodes in hoge mate worden beperkt.

3) De ionencollector is niet als plaat uitgevoerd, maar als wijde spiraal van vrij dun draad. Bij lage drukken krijgt men namelijk een storing door de röntgenstraling die door de op de anode vallende electronen wordt opgewekt. Deze straling komt gedeeltelijk terecht op de ionencollector en maakt daar electronen uit vrij. Hierdoor vloeit door de meetweerstand een stroom die men ten onrechte als ionenstroom zou interpreteren. Bij de uitvoering als dunne spiraal gaat de straling grotendeels langs de collector heen. De, vrij dikke, stroomtoevoerdraden van de collector zijn met email bedekt, om te voorkomen dat deze door de röntgenstralen worden getroffen.

Dit röntgeneffect is één van de belangrijkste onder de factoren die een onderste grens stellen aan het meetgebied van een ionisatiemanometer. Alpert [8]), die het eerst maatregelen heeft genomen waardoor het effect voor een groot deel werd onderdrukt, gebruikte een zeer kleine, gunstig opgestelde, collector, en kon zodoende meten tot een druk van 10^{-10} mm Hg.

4) Goede ontgassing is vooral bij het meten van lage drukken van veel belang. Van elk der roosters (stuurrooster, anode en collector), die zonder steunstaven zijn opgesteld, zijn beide uiteinden uitgevoerd, zodat zij ter ontgassing door een stroom verhit kunnen worden. Daartoe kunnen zij over een meervoudige schakelaar (niet getekend in fig. 3) tezamen worden aangesloten op een speciale wikkeling van de voedingstransformator. Draaddikten en lengten van de roosters zijn zo gekozen dat zij hierbij alle ongeveer dezelfde temperatuur aannemen. Het materiaal is molybdenium, dat bij hoge temperaturen zo stijf blijft dat de roosters niet uitzakken. Tijdens het ontgassen kan ook de gloeidraad in werking zijn, terwijl men om de ballon een oventje kan schuiven, of deze met een gasvlam kan verhitten, om de glaswand van gas te bevrijden.

Ten einde een indruk te krijgen van de invloed van het genoemde röntgeneffect, hebben wij de ionisatiemanometer verbonden met een massaspectrometer tot een gesloten geheel. Ook een massaspectrometer kan in principe als ionisatiemanometer worden opgevat (*fig. 6*); de ionenstroom die de collector treft, is ook hier een maat voor de gasdruk. Bij de massaspectrometer heeft de collector echter een zodanige plaats dat hij door röntgenstraling, afkomstig van de anode, niet kan worden bereikt.

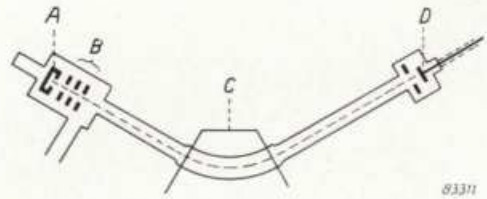


Fig. 6. Principe van een massaspectrometer. Het te analyseren gas vult onder geringe druk de gehele spectrometer en is dus ook aanwezig ter plaatse van het ionisatiekamertje *A*, waar een electronenstroom loodrecht op het vlak van tekening de gasmoleculen ioniseert. De gevormde ionen worden versneld door de versnellings- en focusseringselectrodes *B*. De magneet *C* levert loodrecht op het vlak van tekening een veld, dat zo wordt geregeld dat ionen van de gewenste component van het gas op de collector *D* vallen.

Wij hebben eerst de massaspectrometer in het gebied van 10^{-4} tot 10^{-7} mm Hg als manometer geijkt tegen de ionisatiemanometer, waarbij het systeem met argon was gevuld. (Het was bekend dat de kleinste druk die men met deze massaspectrometer kan meten, 10^{-12} mm Hg bedraagt.) Door nu het systeem langdurig te pompen, konden wij bereiken dat de druk, gemeten met de massaspectrometer, enige malen 10^{-9} mm bedroeg; toch daalde de aanwijzing van de ionisatiemanometer niet beneden enige malen 10^{-8} mm Hg. Hier ligt dus voor dit type manometer de grens van het meetgebied.

Samenvatting. Een ionisatiemanometer met vier electrodes wordt beschreven. De ioniserende electronenstroom wordt gestabiliseerd met behulp van een rooster op constante potentiaal dicht bij de kathode en een grote weerstand in de kathodeketen. De ionenstroom wordt gemeten met een brug van Wheatstone, die twee takken bevat, elk bestaande uit een penthode (E 80 F), en twee andere takken, gevormd door weerstanden. De ionenstroom vloeit door de stuurroosterketen van een der penthodes en beïnvloedt zo de bruginstelling. Een μA-meter dient als indicatie-instrument.

Enige maatregelen, genomen om de nauwkeurigheid bij lage drukken te bevorderen, worden besproken.

Het meetgebied gaat van ca. 10^{-2} mm Hg tot ca. 10^{-8} mm Hg. De onderste grens wordt bepaald doordat, onder invloed van röntgenstraling uit de anode, electronen uit de collector worden vrijgemaakt.

[8]) D. Alpert, New developments in the production and measurement of ultra high vacuum, J. appl. Phys. **24**, 860-876, 1953.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!